



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Tietomallipohjainen asuinkerrostalon elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen laskenta

Kristian Peltomäki

Ohjaajat: Rauno Heikkilä, Tanja Kolli, Antti Tumelius, Leena Neuvonen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö 2019

TIIVISTELMÄ

Tietomallipohjainen asuinkerrostalon elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen laskenta

Kristian Peltomäki

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2019, 123 s. + 16 s. liitteitä

Työn ohjaajat yliopistolla: Rauno Heikkilä, Tanja Kolli

Diplomityön tavoitteena oli tietomallipohjaisen elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen laskennan ja ohjauksen kehittäminen asuinkerrostalon suunnittelussa.

Elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen laskentaan valittiin vertailun jälkeen Level(s) – menetelmä. Työssä suoritettiin esimerkkikohteen investointikustannusten, elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen laskenta. Elinkaarilaskentaohjelmistoksi valittiin vertailun jälkeen One Click LCA, investointikustannus laskettiin tavoitehintamenetelmällä TAKU – ohjelmistolla ja energiankulutusta arvioitiin CADS – ohjelmistolla.

Esimerkkikohteen investointikustannuksia kasvattavia tekijöitä olivat tavanomaista haastavammat rakenteet ja yhteistilojen suuri määrä. Elinkaarikustannusten arvioinnissa havaittiin rakennuskustannusten hyvin merkittävä osuus. Tarkastellun rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki oli hieman vertailukohteita suurempi. Merkittävimmät hiilijalanjälkeä kasvattavat tekijät olivat käytön aikainen energiankulutus ja paljon energiaa vaativan valmistusprosessinsa vuoksi suuret kasvihuonekaasupäästöt muodostavan betonin tavallista suurempi määrä.

Rakennuksen kustannusarviointia voidaan suunnittelun aikana tehdä tilaohjelmaan perustuen tavoitehintamenetelmällä tai myöhemmässä vaiheessa tarkentuvien suunnitelmien ja yhdistelmä tietomallin avulla rakennusosa - arviomenetelmällä. Rakennusosa - arviomenetelmä on kustannusarvioinnissa tavoitehintamenetelmää tarkempi. Molempia voidaan käyttää suunnittelun ohjaukseen. Rakennusosa - arviomenetelmän käyttäminen vaatii rakennusosien määrätietojen lisäksi paljon tarkkoja tietoja materiaali- ja työkustannuksista sekä työmaan yhteiskustannusosuuksista.

Hiilijalanjäljen laskentaa ei vielä ainakaan voida tehdä suoraan tilaohjelmaan perustuen. Tarveselvitysvaiheessa voidaan siten tehdä vain karkeamman tason hiilijalanjäljen laskentaa ja ohjausta. Tarkempaan hiilijalanjäljen laskentaan tarvitaan rakennusosien määrä ja niiden (tuotteiden) ympäristöselosteiden sisältämät tiedot.

Tietomallipohjainen suunnittelu mahdollistaa aikaisempaa paremmin myös hiilijalanjäljen laskennan käyttämisen rakennuksen suunnittelun ohjaukseen. Varhaisessa suunnitteluvaiheessa tilaohjelmaan perustuen laskenta on vielä kehittymätöntä, työlästä ja epätarkkaa. Elinkaarilaskentaohjelmisto ei sisältänyt energiankulutuksen laskentaa eikä kattavaa rakennusosa-arviomenetelmää. Yhdistämällä tietomallipohjainen kustannus- ja energiankulutuslaskenta elinkaarilaskentaohjelmistoon, voitaisiin tietomallipohjaista tietoa hyödyntää vieläkin paremmin. Pelkkä kustannusten tai hiilijalanjäljen laskenta ei vielä ole suunnittelun ohjausta. Laskentaa tulisi tehdä jatkuvasti suunnitteluprosessin aikana ja sen edetessä. Ohjaus edellyttää laskentatulosten vertailua asetettuihin vertailukriteereihin, aikaisempiin suunnitteluratkaisuihin ja vertailukohteisiin. Vertailukriteereiden tarkentamiseen suositellaan jatkotutkimuksia. Esimerkkikohteen suunnitteluprosessissa laskentatulosten käyttö suoraan suunnittelunohjaukseen oli vielä vähäistä. Tuloksia esiteltiin tilaajalle, mutta hankkeen suunnittelutyö ei diplomityön toteutusaikana edennyt riittävästi, jotta ohjauksen vaikutuksia olisi voitu tutkia.

Asiasanat: Elinkaariarviointi, Hiilijalanjälki, Elinkaarikustannus, Tietomalli, Asuinkerrostalo

ABSTRACT

BIM – based calculation of the life cycle costs and carbon footprint of an apartment building

Kristian Peltomäki

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Master's thesis 2019, 123 p. + 16 p. appendixes

Supervisors at the university: Rauno Heikkilä, Tanja Kolli

The aim of the thesis was to develop the building information model (BIM) – based life cycle cost and carbon footprint calculation and guidance in residential apartment building design process.

After the comparison, the Level(s) method was chosen for the calculation of the life cycle costs and carbon footprint. Calculation of the investment cost, life-cycle costs and carbon footprint was carried out for the exemplary project. After a comparison, One Click LCA software was chosen as the life cycle assessment software, the investment cost was calculated using TAKU software and the energy consumption was estimated with CADS software.

Factors that increased the investment costs of the exemplary project were the structures that are more challenging than usual and the large number of common spaces. The construction cost was identified to produce a very significant proportion of the life cycle costs. The carbon footprint of the examined building was slightly higher than that of the benchmarks. The major factors of the carbon footprint were the use stage energy consumption and a higher than usual amount of concrete, which produces high greenhouse gas emissions due to its energy-intensive manufacturing process.

The cost estimation of a building can be done during the planning process based on a design brief, or at a later stage, with more detailed plans and a building information model, using the amounts of building elements. The building element method is more accurate than the design brief method in cost estimation. Both can be used to guide the design process. The use of the building element method requires a lot of detailed information about the material and labor costs, in addition to the quantity information for the building elements. At the moment, carbon footprint calculation cannot be done

directly based on the design brief. Thus, carbon footprint calculation and guidance of the design process can only be done at a coarser level in the needs assessment phase. A more accurate calculation of the carbon footprint requires the number of building components and the information contained in their environmental product declarations.

BIM - based design enables better use of carbon footprint calculation as a guidance tool in the design process. At the early planning stage, calculation based on the design brief is still underdeveloped, laborious and inaccurate. The life cycle calculation software did not include the calculation of energy consumption or a comprehensive building element cost estimation method. Combining BIM - based investment cost and energy calculation with life-cycle assessment software could enable even better use of the BIM - based data. Simply calculating the costs or the carbon footprint cannot be considered as guiding the design process. The calculation should be done continuously during the design process as the design progresses. The guidance requires a comparison of the calculation results against the set benchmarks, previous design solutions and benchmarks from other buildings. Further studies are recommended to refine the benchmark criteria. In the example design process, the use of the calculation results to guide the design process was still limited. The results were presented to the client, but the project's design work did not progress sufficiently during the implementation of the Master's thesis in order to study the effects of the guidance.

Keywords: Life Cycle Assessment, Carbon footprint, Life Cycle Cost, Building Information Model, Apartment building

ALKUSANAT

Työn tarkoitus oli luoda Pohjois-Suomen opiskelija-asuntosäätiölle edellytykset ottaa elinkaarikustannukset ja hiilijalanjälki huomioon jo käynnissä olevassa rakennushankkeessa sekä kehittää yrityksen uudisrakentamisen toimintamallia elinkaarinäkökulmasta tulevaisuuden hankkeita varten. Työssä tutkittiin myös tietomallin hyödyntämisen edellytyksiä ja hyötyjä elinkaarilaskennassa. Kiitän Pohjois-Suomen opiskelija-asuntosäätiötä tästä mahdollisuudesta perehtyä rakentamisen elinkaaren hiilijalanjäljen laskentaan ja olla osaltani mukana ilmastonmuutoksen hillitsemisessä. Olen kiitollinen myös kaikesta siitä, mitä työni aikana opin asuinkerrostalon suunnitteluprosessista, rakennushankkeen hallinnasta ja rakentamisen kustannuslaskennasta.

Haluan kiittää työn ohjaajia kaikesta avusta ja kannustuksesta työn aikana. Kiitän avusta myös seuraavia henkilöitä ja yrityksiä: Heikki Angeria, Vesa Pitsinki, Tytti Bruce-Hyrkäs, Skanska, Sweco ja Oulun Energia. Työ olisi jäänyt tekemättä myös ilman perhettäni ja ystäviäni. Teidän tukenne merkitsee minulle erityisen paljon. Kiitos.

Oulu, 27.8.2019

Kristian Peltomäki

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	12
1.1 Rakentamisen päästöjen muodostuminen	12
1.2 Rakennuksen elinkaaren ympäristöpäästöjen säädösohjaus	16
1.3 Rakennuksen energiankulutus.....	19
1.4 Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment, LCA).....	20
1.4.1 Standardit.....	20
1.4.2 Elinkaaren vaiheet	23
1.4.3 Elinkaariarvioinnin rakenne.....	24
1.4.4 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely	25
1.4.5 Inventaarioanalyysi, LCI	25
1.4.6 Vaikutusarviointi, LCIA	28
1.4.7 Tulosten tulkinta	32
1.4.8 Elinkaariarvioinnin soveltuvuus rakentamisen päästöjen tutkimiseen	33
1.5 Elinkaarikustannukset (Life Cycle Cost, LCC)	35
1.5.1 Investointikustannus	35
1.5.2 Elinkaarikustannus.....	36
1.6 Tietomallin hyödyntäminen elinkaariarvioinnissa.....	37
1.7 Hiilijalanjälki- ja elinkaarikustannuslaskennan tulosten yhdistäminen	40
1.8 Tavoite.....	41
2 TIETOMALLIPOHJAINEN ASUINKERROSTALON ELINKAARIKUSTANNUSTEN JA HIILIJALANJÄLJEN LASKENTA	42
2.1 Laskentamenetelmän valinta.....	42
2.2 Laskentaohjelmiston valinta.....	44
2.3 Asuinkerrostalohankkeen laskennan ja arvioinnin suorittaminen.....	47
2.3.1 Asuinkerrostalo ja sen laskentatiedot	47
2.3.2 Oletukset, rajaukset, yksinkertaistukset ja arviot	49
2.3.3 Laskentaohjelmiston käyttö	52
2.3.4 Rakennuksen tietomallin muokkaus laskentaa varten	52
2.4 Empiiriset laskennat ja havainnoinnit	54

2.4.1	Energiankulutuksen laskenta	54
2.4.2	Elinkaaren hiilijalanjäljen laskenta	55
2.4.3	Elinkaarikustannusten laskenta	57
2.4.4	Rakennusten vertailututkimusten suorittaminen	58
2.4.5	Rakenneosien vertailututkimusten suorittaminen	62
2.4.6	Asuinkerrostalohankkeen suunnitteluprosessin ohjaukseen osallistuminen	66
3	TULOKSET	69
3.1	Rakennuksen energiankulutus	69
3.2	Elinkaaren hiilijalanjälki	70
3.3	Elinkaarikustannukset	74
3.3.1	Investointikustannus	74
3.3.2	Elinkaarikustannus	75
3.4	Rakennusten vertailutulokset	79
3.4.1	Energiankulutuksen vertailutulokset	80
3.4.2	Elinkaaren hiilijalanjäljen vertailutulokset	81
3.4.3	Elinkaarikustannusten vertailutulokset	82
3.5	Rakenneosien vertailutulokset	83
3.6	Havainnot suunnitteluprosessin ohjaukseen osallistumisesta	88
4	PÄÄTELMÄT	91
4.1	Rakennuksen energiatehokkuus	91
4.2	Rakennuksen ekotehokkuus	91
4.3	Rakennuksen kustannustehokkuus	94
4.4	Rakennusten vertailuaineiston arviointi	96
4.5	Rakenneosien vertailuaineiston arviointi	99
4.6	Suunnitteluprosessin ohjauksen onnistuminen	101
4.7	Jatkotutkimus- ja kehitysehdotukset	103

LÄHDELUETTELO

DIPLOMITYÖN LIITTEET

Liite 1. PSOAS sr UNO – rakennuksen energiatodistus.

Liite 2. Tavoitehintamenettely – laskelman tulokset.

Liite 3. BIM-LCA – integrointiin soveltuvia työkaluja (Bueno ja Fabricio, 2018).

Liite 4. LCI – menetelmien laskentakaavat (Crawford ym, 2018).

MERKINNÄT JA LYHENTEET

ARA	Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus
BIM	Building Information Model, ks. Tietomalli.
CAD	Computer Aided Design, ks. Tietokoneavusteinen suunnittelu.
CEN	Yksityinen voittoa tavoittelematon järjestö, jonka päätehtävinä on edistää eurooppalaista standardisointia.
CLT	Cross Laminated Timber, ristiin liimattu massiivipuu tai monikerroslevy.
Elinkaari	Tuotteen tai palvelun vaiheet raaka-aineen hankinnasta käyttöön ja loppukäsittelyyn.
Elinkaariarviointi	Tuotteen tai palvelun ympäristövaikutusten tutkimista sen koko elinkaaren ajalta.
Elinkaarikustannukset	Tarkoittaa kaikkia niitä yhteenlaskettuja kustannuksia, joita kohteelle syntyy tai voidaan olettaa syntyvän sen koko elinkaaren aikana.
E-luku	E-luku (kWhE/m ²) on energiamuotojen kertoimilla painotettu rakennuksen vuotuinen ostoenergiankulutus lämmitettyä nettoalaa kohden.
Embodied energy	Ks. Sitoutunut energia/hiili.
EN	Eurooppalainen standardi, joka on laadittu joko CEN:ssä, CENELEC:ssä tai ETSI:ssä
Energiaselvitys	Energiatodistusta laajempi selvitys rakennuksen energiankäytöstä.
Energiatodistus	Yksinkertainen ja selkeä tapa osoittaa rakennuksen energiatehokkuus.
EPD	Environmental Product Declaration, ks. Ympäristöseloste.
EU	Euroopan Unioni.
GBC Finland	Green Building Council, Suomi. Yhdistys, joka kokoaa kestävän kehityksen osaamista Suomessa. Tarkoituksena edistää rakennetun ympäristön kestäväään kehitykseen liittyvää tietoisuutta ja osaamista.

GHG	Greenhouse gas, ks. KHK - kasvihuonekaasu.
GWP	Global Warming Potential. Indeks, joka kertoo aineen vaikutuksen ilmastoon lämpenemiseen. Muiden aineiden arvoja verrataan hiilidioksidiin, jonka GWP arvo on 1,0.
Hiilidioksidi, CO ₂	Hiilestä ja hapesta koostuva kemiallinen yhdiste. Merkittävä ihmistoiminnan tuottama ilmastoa lämmittävä kasvihuonekaasu.
Hiilidioksidiekvivalentti, CO ₂ e	Kasvihuonekaasupäästöjen yhteismitta, jonka avulla voidaan laskea yhteen eri kasvihuonekaasujen päästöjen vaikutus kasvihuoneilmiön voimistumiseen. Tässä laskennassa kaikkien kasvihuonekaasujen vaikutus muutetaan vastamaan hiilidioksidin ilmastovaikutusta. Määrä ilmaistaan massana, yksikkönä käytetään [kg] tai [t].
Hiilijalanjälki	Kuvaa tuotteen tai toiminnan elinkaaren aikana syntyvien kasvihuonekaasujen määrää. Voidaan viitata myös kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjen sijaan pelkkiin hiilidioksidipäästöihin.
Hiilinielu	Hiilivarasto, jonka koko kasvaa. Vastakohta hiilen lähteelle. Luonnollisia hiilinieluja ovat meret sekä kasvit, jotka käyttävät fotosynteesiä.
Hiilivarasto	Hiilivarastossa hiili on varastoituneena siten, ettei se ole ilmakehässä. Se voi olla sitoutuneena esimerkiksi eläviin organismeihin, kuten kasveihin tai hautautuneena maan alle. Kasvin kasvaessa sen sisältämä hiilivarasto kasvaa ja se toimii hiilinieluna.
IFC	Rakennusalan standardi oliopohjaisen tiedon siirtämiseen ohjelmistojen välillä.
Ilmastomuutos	Merkittävä pitkän aikavälin muutos globaalissa tai paikallisessa ilmastossa.
Inventaarioanalyysi	Elinkaariarvioinnin vaihe, jossa kerätään tietoja ja valitaan laskentatavat.
ISO	Kansainvälinen standardoimisjärjestö
Kasvihuoneilmiö	Luonnollinen fysikaalis - kemiallinen ilmiö, jossa hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen vaikutuksesta ilmakehän alimmat osat lämpenevät.

KHK	Kasvihuonekaasu: kaasu, joka ilmakehässä ollessaan päästää lähes kaiken auringonsäteilyn lävitseen, mutta absorboi suuren osan maan pinnalta lähtevästä lämpösäteilystä aiheuttaen kasvihuoneilmion.
LCA	Life Cycle Assessment, ks. Elinkaariarviointi.
LCC, LCCA	Life Cycle Cost (Assessment), ks. Elinkaarikustannukset.
LCI	Life Cycle Inventory, ks. Inventaarioanalyysi.
LCIA	Life Cycle Impact Assessment, ks. Vaikutusarviointi.
Level(s)	Euroopan komission, EU:n jäsenmaiden ja kestävän rakentamisen asiantuntijoiden yhteistyössä kehittämä menetelmä, jolla voidaan mitata rakentamisen resurssitehokkuutta.
LKV	Lämmin käyttövesi.
LTO	Lämmöntalteenotto ilmanvaihtojärjestelmästä.
Nettonykyarvo	Toiminnan kannattavuuden mittari. Nykyarvoon diskontattujen tulojen ja kustannusten summa.
NPC	Net Present Cost, ks. Nettonykyarvo. NPC ottaa huomioon ainoastaan kustannukset.
NPV	Net Present Value, ks. Nettonykyarvo. NPV huomioi myös tulot.
OCLCA	One Click LCA. LCA - laskentaohjelmisto
PSOAS sr	Pohjois-Suomen Opiskelija-asuntosäätiö sr.
RTS	Rakennustietosäätiö on rakennusalan puolueeton vaikuttaja ja Rakennustiedon omistajayhteisö, joka vastaa koko yhteisön tutkimus- ja kehitystoiminnasta sekä huolehtii yhteiskuntasuhteista.
SFS	Suomen standardoimisliitto
Sitoutunut energia	Tuotteen tai palvelun valmistukseen tai tuottamiseen tarvittavan energian summa. Laskentaa voidaan käyttää energian tuottamiseen tai energiasäästöihin pyrkivien laitteiden tai järjestelmien vertailussa.
Tietokoneavusteinen suunnittelu	Tietokoneen käyttöä suunnittelun apuvälineenä. Sisältää numeerista laskentaa, 2D-piirtämistä, 3D-mallinnusta ja tietokonesimulointia.
Tietomalli	Rakennuksen tietomalli on rakennuksen ja rakennusprosessin koko elinkaaren aikaisten tietojen kokonaisuus digitaalisessa muodossa.

	Tietomalliin liittyy myös rakennuksen geometrian esittäminen kolmiulotteisesti.
Vaikutusarviointi	Elinkaariarvioinnin vaihe, jossa määritetään tutkittavat vaikutusluokat, vaikutusluokkien indikaattorit ja karakterisointikertoimet, joiden avulla eri aineiden ympäristövaikutukset määritellään valitun indikaattorin yksikössä.
VTT	Moniteknologinen Pohjois - Euroopan johtava soveltavaa tutkimusta tekevä tutkimuskeskus
Ympäristöseloste	Tuotteen ympäristöseloste on standardoitu tapa esittää tiedot tuotteen ympäristövaikutuksista.

1 JOHDANTO

Pohjois-Suomen Opiskelija-asuntosäätiö sr (PSOAS sr) järjestää asumispalveluita Oulussa peruskoulun jälkeisiä opintoja suorittaville nuorille. PSOAS sr suunnittelee Oulun Välkylään 20 - kerroksista asuinkerrostaloa, jonka asuntoja se vuokraa opiskelijoille. Hankkeessa haluttiin ottaa huomioon rakentamisen ympäristövaikutukset ja hanke toimii PSOAS sr:n pilottihankkeena elinkaaren hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten laskennassa. Elinkaarilaskenta pyrittiin aloittamaan mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, jotta hankkeen suunnittelua voitaisiin ohjata elinkaarilaskennan avulla ja voitaisiin tehdä ympäristön kannalta kestäviä ratkaisuja. Elinkaarikustannukset haluttiin ottaa huomioon, jotta rakentamisvaiheessa ei valittaisi halvinta mahdollista tapaa rakentaa, vaan valittaisiin ratkaisut, jotka ovat edullisimmat rakennuksen koko elinkaari huomioon ottaen.

1.1 Rakentamisen päästöjen muodostuminen

Suomi on Euroopan Unionin (EU) ilmastopolitiikan myötä sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä (hiilidioksidi, metaani, troposfäärin otsoni, typpioksiduuli) huomattavasti vuoteen 2050 mennessä. Rakennusalan tiedetään muodostavan noin 40 prosenttia Suomessa syntyvistä kasvihuonekaasupäästöistä (Green Building Council Finland, 2013). Rakentamista on Suomessa säädelty toistaiseksi vain energiatehokkuuden osalta; rakentamisen kasvihuonekaasupäästöjä ei ole Suomessa vielä lainsäädännöllä rajoitettu. Ympäristöministeriö valmistelee parhaillaan lainsäädäntöä rakentamisen hiilijalanjäljen ohjaamiseksi. Hiilijalanjälki kuvaa sitä, kuinka paljon kasvihuonekaasupäästöjä tuotteen tai toiminnan elinkaaren aikana syntyy. Ympäristöministeriön tavoitteena on, että hiilijalanjäljen raja-arvoon perustuva velvoittava lainsäädäntö on voimassa 2020-luvun puoliväliin mennessä (Huttunen, 2018). Tuotteiden ja prosessien elinkaaren ympäristövaikutuksia on arvioitu maailmalla jo vuosikymmeniä. Vaikutusten arviointia on tehty useilla keinoilla, mutta yleiseksi tavaksi on viime vuosina vakiintunut elinkaariarviointi, LCA.

Useiden tutkimusten perusteella vaikuttaa siltä, että suurin tekijä rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen muodostumisessa on rakennuksen käytönajan energian tuottamisesta

johtuvat päästöt. (Green Building Council Finland, 2013; Bionova Oy, 2017; Virkamäki *ym.*, 2017) Rakennuksen lämmöneristävyydellä on merkittävä vaikutus sen elinkaaren aikana syntyviin päästöihin. Hyvä lämmöneristävyys pienentää käyttövaiheen energiankulutusta jäähdytys- ja lämmitystarpeen vähentyessä. (Citherlet ja Defaux, 2007; Bionova Oy, 2017) Asdrubalin (2009) mukaan rakennuksen lämpö- ja äänieristeiden materiaalivalinnoilla on ympäristövaikutusten kannalta merkittävä vaikutus kaikkiin rakennuksen elinkaaren vaiheisiin (rakennus, käyttö, loppusijoitus) (Asdrubali, 2009). Pitkään päästöjen vähentämisen keinona on käytetty energiankulutuksen pienentämistä ja rakennusten energiatehokkuus on kehittynyt huomattavasti (Röck *ym.*, 2018). Energiatehokkuuden kehittymisen vuoksi viime aikoina on ryhdytty kiinnittämään enemmän huomiota myös rakentamisvaiheen ja ylläpidon aiheuttamiin päästöihin (Röck *ym.*, 2018 ja siinä olevat viitteet [6-12]).

Rakennusmateriaalien ympäristövaikutuksia tutkittaessa on betonin todettu olevan materiaaleista suurin päästöjen aiheuttaja (Asif, Muneer ja Kelley, 2007; Chau *ym.*, 2007; Radhi ja Sharples, 2013; Teshnizi *ym.*, 2018). Betonin on todettu sisältävän 61 % rakennuksen materiaaleihin sitoutuneesta energiasta ja tuottavan jopa 99 % rakennusmateriaalien tuottamista ympäristöpäästöistä (Asif, Muneer ja Kelley, 2007). Julkisivumateriaalien vertailu Bahrainissa osoitti, että paras keino pienentää hiilidioksidipäästöjä on vähentää betoniharkkojen valmistuksessa syntyviä päästöjä (Radhi ja Sharples, 2013). Chau *ym.* (2007) tutkivat 25 erilaisen rakennuksen materiaalien osuutta rakennuksen elinkaaren ympäristövaikutuksissa. Tutkimuksessa ympäristövaikutuksia tutkittiin kolmessa vahinkoluokassa: Ihmisten terveys, luonnonympäristö ja luonnonvarat. Tutkimus osoitti, että betoni on suurin yksittäinen tekijä, tuottaen 20–28 % ympäristövaikutuksesta. (Chau *ym.*, 2007).

Teshnizi *ym.* (2018) vertailivat kahden Vancouverissa sijaitsevan 18-kerroksisen kerrostalon ympäristövaikutuksia ja elinkaaren kustannuksia. Toinen rakennuksista oli perinteinen betonirakenteinen, toisen runko oli pääosin puurakenteinen. Molemmille rakennuksille suoritettiin elinkaaren hiilijalanjäljen laskenta, joiden tuloksista todettiin, että betonirakenteisen talon runkomateriaalien vaikutus ilmaston lämpenemiseen oli 36 % puurakenteista suurempi. Kaikkien rakennusmateriaalien vaikutus ilmaston lämpenemiseen koko elinkaaren aikana oli puurunkoisessa talossa 25 % betonirunkoista pienempi. Rakennusten käytöstä aiheutuvia ympäristöpäästöjä ei otettu huomioon

rakennusten vertailussa. Samassa tutkimuksessa vertailtiin myös rakennusten kustannuksia. Suurin ero kustannuksiin talojen välillä syntyi rakentamisvaiheessa. Puutalon rakentaminen maksoi 11 % betonirunkoista enemmän. Tutkimuksessa todetaan, että kustannusero ei kuitenkaan johtunut rakenteiden eroavaisuuksista, vaan pääasiassa hankkeen innovatiivisuudesta ja että tulevaisuudessa vastaavan rakennuksen rakentamisen kustannukset eivät olisi yhtä suuret. (Teshnizi *ym.*, 2018) Suomessa on myös rakennettu puukerrostaloja. Domus Arctica – säätiö (DAS) rakennuttaa 8 - kerroksisen CLT (Cross Laminated Timber) – runkoisen kerrostalon Rovaniemelle. Rakennuksen suunnittelun pohjana oli alusta alkaen pieni hiilijalanjälki. Hankkeen aikana muun muassa elinkaaren hiilijalanjälki ja elinkaarikustannukset tullaan huomioimaan. (Poikajärvi *ym.*, 2018)

Muga *ym.* (2008) tutkivat rakennuksen kattoratkaisun merkitystä ympäristövaikutuksiin. Tutkimuksessa vertailtiin viherkaton ja perinteisemmän huopakaton ympäristövaikutuksia. Tutkittavat ympäristövaikutukset olivat päästöt ilmaan (rikkidioksidi, hiilimonoksidi, typpioksidi ja pienhiukkaset) ja kasvihuonekaasut (hiilidioksidi, metaani, typpidioksidi ja kloorifluorihilivety). Tutkimuksessa todettiin, että materiaalien hankinta- ja valmistusvaiheissa viherkaton ympäristöpäästöt olivat 45 % huopakattoa suuremmat. Käytön aikaiset päästöt huopakatolla olivat 46 % viherkattoa suuremmat. Käyttövaiheen päästöjen osuus kokonaispäästöistä oli viherkatossa 72 % ja huopakatossa 80 %. Käyttövaiheen suuri osuus johtui energiankulutuksesta. Tutkimuksessa rakennuksen elinkaaren oletettiin olevan 45 vuotta ja koko elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset olivat huopakatolla 46 % viherkattoa suuremmat. Tutkittujen vaihtoehtojen erot käyttövaiheen päästöissä johtuivat pääasiassa viherkaton pienemmästä energiankulutuksesta. Tutkimuksessa todetaan, että energiankulutus riippuu mm. rakennuksen sijainnista ja tyypistä, käytetyn eristeen määrästä huopakatossa ja viherkaton multakerroksen paksuudesta, joten energiankulutus ja sen myötä koko elinkaaren ympäristövaikutus ei välttämättä aina ole viherkatossa pienempi. (Muga, Mukherjee ja Mihelcic, 2008)

Ikkunoilla on merkittävä vaikutus rakennuksen lämmitykseen ja jäähdytykseen. Rakennuksen lämmitysenergiasta jopa 40 % voidaan menettää ikkunoiden kautta. Vastaavasti jopa 87 % rakennuksen lämmöstä voidaan saavuttaa ikkunoiden kautta. (McGee, 2013). Schmidt ja Crawford (2018) tutkivat erilaisten ikkunoiden

ympäristövaikutuksia. Tutkimuksessa vertailtiin kuutta ikkunavaihtoehtoa: yksinkertainen, kaksinkertainen ja kolminkertainen lasi puukehyksillä, sekä alumiinikehyksillä. Tutkimus osoitti, että lasien määrän lisääminen lisäsi materiaalivaiheen kasvihuonekaasupäästöjä, mutta pienensi käyttövaiheen kasvihuonekaasupäästöjä. 50 vuoden elinkaaren aikana käyttövaiheen päästöt olivat niin paljon pienemmät, että lasien määrää kasvattaessa koko elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt pienenevät. (Schmidt ja Crawford, 2018).

Rakentamisen aikana syntyvien päästöjen merkitystä rakennuksen koko elinkaaren aikana syntyvissä päästöissä on joissakin tutkimuksissa jätetty huomiotta niiden pienen merkityksen vuoksi. Kellenberger ja Althaus (2009) tutkivat rakentamisprosessin tärkeyttä rakennuksen päästöjen laskennassa. Tutkimus osoitti, että rakentamisesta syntyvät päästöt aiheuttavat noin 8 % ja rakentamisen aikana syntyvät jätteet noin 4 % rakennuksen koko elinkaaren ympäristövaikutuksista. Tutkimuksessa todetaan, että näiden tekijöiden jättäminen huomiotta koko rakennuksen elinkaaritutkimuksessa vaikuttaa hyväksyttävältä. (Kellenberger ja Althaus, 2009). Bilec ym. (2006) tutkivat betonirakenteisen parkkihallin rakentamisesta syntyviä päästöjä. Tutkimuksen tarkoitus oli tutkia ainoastaan rakentamisen aikana syntyviä päästöjä, ottamatta huomioon materiaalien valmistusta. Tutkimus osoitti, että selkeästi suurimmat päästöt syntyvät materiaalien kuljetuksesta rakennuspaikalle, aiheuttaen lähes 60 % rakentamisen päästöistä. Tämä tutkimustulos korostaa sitä, että materiaalien hankinta läheltä rakennuspaikkaa on hyvä keino vähentää rakentamisen päästöjä. (Bilec ym., 2006). Puujätteen on tutkittu aiheuttavan merkittävän osan rakennustyömaan jätteistä (Poon, Yu ja Ng, 2001). Hossain ja Poon (2018) tutkivat rakennustyömaalla käytettävän puumateriaalin kierrätettävyyden vaikutusta päästöihin ja totesivat, että käyttämällä kierrätettyä puutavaraa ja lajittelemalla sekä uudelleen kierrättämällä rakennuksen aikana käytetty puutavara voidaan rakentamisesta syntyviä päästöjä pienentää. Tutkimuksessa todettiin, että materiaalien kuljetusetäisyydellä on merkittävä vaikutus päästöihin, mutta kierrättämällä puujäte voidaan silti saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä, vaikka kuljetusetäisyys olisi 20 % suurempi. (Hossain ja Poon, 2018).

1.2 Rakennuksen elinkaaren ympäristöpäästöjen säädösohjaus

Rakennuksen hiilijalanjäljen pienentämistä voidaan laajemmassa mittakaavassa edistää valtion ohjeistuksella. Euroopassa rakennusmateriaalien päästöjä ohjataan säädöksillä jo Ranskassa, Hollannissa ja Belgiassa. Sveitsissä ja Itävallassa päästöohjaus perustuu vielä vapaaehtoisuuteen. Päästöjä ohjataan kansallisella tasolla myös Saksassa ja Iso-Britanniassa. Valtiojohtoiseen päästöohjaukseen on Euroopassa vakiintunut kolme erilaista mallia (Kuva 1): energiatehokkuuden ohjaus (Sveitsi), hiilijalanjäljen ohjaus (Ranska) ja kokonaisympäristöhaitan ohjaus (Hollanti). Kokonaisympäristöhaittaa tutkittaessa kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi huomioon otetaan myös kaikki muut ympäristövaikutukset. (Bionova Oy, 2017).



Kuva 1. Euroopassa käytössä olevia rakennuksen ympäristöpäästöjen ohjauskeinoja. (Bionova Oy, 2017).

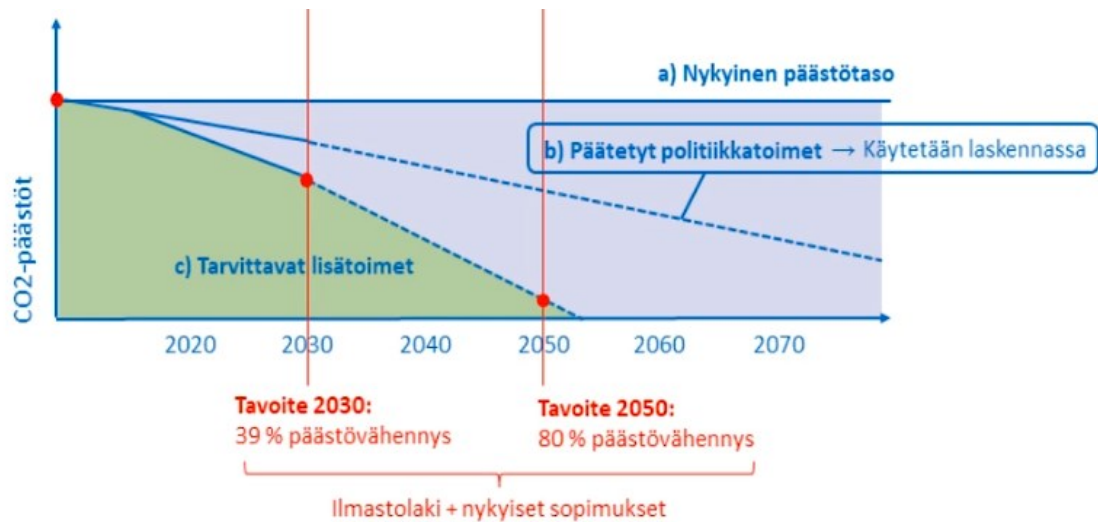
EU:n kehittämän Level(s) – rakentamisen resurssitehokkuusmittariston pilotointivaihe on alkanut vuoden 2018 alusta. Testauksen tarkoitus on tutkia menetelmän soveltuvuutta ja helppokäyttöisyyttä rakennushankkeen arviointiin. Suomessa testaus keskittyy

päättävöitteisiin 1 ja 2 (rakentamisen hiilijalanjälki ja energiatehokkuus) ja siihen osallistuu yli 20 rakennushanketta ja yli 30 tahoa. Suomessa testausta koordinoi ympäristöministeriö, Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus ARA, Green Building Council Suomi sekä Rakennustieto. Pilotoinnin tulosten pohjalta menetelmää kehitetään edelleen. (Ympäristöministeriö, 2018a). Level(s) – menetelmän vaikutus EU:n säädöskehityksessä on vielä auki (Simon Le Reux, projektiasiantuntija, ympäristöministeriö, 2018).

Ympäristöministeriön tavoitteena on ”luoda Suomeen vähähiilisen rakentamisen arviointi- ja raportointimenetelmä, joka pohjautuu EN standardeihin ja ottaa huomioon Level(s) – menetelmän periaatteet.” (Ympäristöministeriö, 2018a). VTT selvitti rakentamisen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä edistävän säädösohjauksen toteutettavuutta ja vaikutuksia Suomessa. Selvityksessä todetaan, että merkittävien päästövähennysten saavuttamiseksi täytyy uudis- ja korjausrakentamiselle asettaa kansallinen kasvihuonekaasu (khk) - päästöjen raja-arvo. Suurimmat säästöt saataisiin, mikäli raja-arvo koskisi sekä materiaalien, että energian käytön päästöjä. Säästöjen maksimoimiseksi raja-arvon tulisi myös olla niin vaativa, että rakennusmateriaalien ja energiankäytön ratkaisuissa täytyisi tehdä parannuksia lähes kaikissa rakennushankkeissa. Raja-arvojen määrittystä varten tulee selvityksen mukaan perehtyä tarkasti eri rakennustyyppien khk – arvoihin, jotta kaikille rakennustyypeille voidaan määrittää oma raja-arvo. (Häkkinen ja Vares, 2018).

Ympäristöministeriö valmistelee lainsäädäntöä rakentamisen hiilijalanjäljen ohjaamiseksi. Ympäristöministeriön tavoitteena on, että hiilijalanjäljen raja-arvoon perustuva velvoittava lainsäädäntö on voimassa 2020-luvun puoliväliin mennessä (Huttunen, 2018). Marraskuussa 2018 ympäristöministeriö julkaisi rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmän lausuntokierrosta varten. Maaliskuussa 2019 järjestetyssä vähähiilisen rakentamisen vuosiseminaarissa ympäristöministeriön erityisasiantuntija Matti Kuittinen esitteli lausuntokierroksella esiin tulleita kommentteja ja menetelmän tulevaisuutta. Menetelmän koekäyttö alkaa elokuussa 2019. Koekäyttöön osallistuvat hankkeet voivat hakea ympäristöministeriöltä avustusta. Menetelmässä laskentaan sisällytetään rakennuksen runko, täydentävät rakenteet ja keskeiset osat talotekniikasta. Raja-arvoissa ei oteta huomioon perustusten vaikutusta. Arviointijakson pituutena voi menetelmässä käyttää 50 vuotta tai rakennuksen tavoiteikäyttöikää.

Energian päästökertoimina menetelmässä käytetään skenaariota, jossa energian tuottamisesta syntyvien päästöjen määrä pienenee päätettyjen politiikkatoimien mukaisesti tulevaisuudessa (Kuva 2). (Kuittinen, 2018, 2019; Ympäristöministeriö, 2018c, 2019).



Kuva 2. Energiantuotannon päästöoletukset elinkaaren aikana. (Kuittinen, 2019).

Euroopan komission, EU:n jäsenmaiden ja kestävän rakentamisen asiantuntijoiden yhteistyössä kehittämä Level(s) on menetelmä, jolla voidaan mitata rakentamisen resurssitehokkuutta. Sen tavoitteena on yhtenäistää kestävän rakentamisen mittareita ja mahdollistaa seuraavien askelten ottaminen Euroopan ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi rakennusalaalla.

Level(s) sisältää kuusi mittaria:

1. Elinkaaren hiilijalanjälki
2. Resurssitehokas materiaalien käyttö
3. Veden kulutus
4. Terveelliset tilat ja sisäilman laatu
5. Sopeutuminen ilmastonmuutokseen
6. Elinkaarikustannukset

Level(s) – menetelmän avulla EU pyrkii edistämään elinkaariajattelua ja erityisesti laajentamaan elinkaariarviointi (LCA) ja elinkaarikustannus (LCC) – työkalujen käyttöä Euroopassa. Level(s) - mittarit heijastavat EU:n poliittisia tavoitteita ympäristölle,

terveydelle ja rakennetulle ympäristölle. Laskentatavat tukeutuvat soveltuvilta osin vastaaviin EN ja ISO – standardeihin. Tämä mahdollistaa yhteisen lähestymistavan, joka soveltuu laajaan käyttöön EU:n alueella. (Dodd *ym.*, 2017; Ympäristöministeriö, 2018a)

1.3 Rakennuksen energiankulutus

Useiden tutkimusten mukaan suurin osa rakennuksen koko elinkaaren aikana syntyvästä hiilijalanjäljestä syntyy usein käytönajan energian tuottamisesta. (Zabalza Bribián, Valero Capilla ja Aranda Usón, 2011; Cabeza *ym.*, 2014; Bionova Oy, 2017) Käyttövaiheen kasvihuonekaasupäästöt riippuvat useista jo suunnitteluvaiheessa tehtävistä ratkaisuksista kuten rakennuksen tyyppi, vaipan rakenne, lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät (Schmidt ja Crawford, 2018). Ympäristöministeriö on vuonna 2018 julkaissut ohjeen rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskentaan. Sen avulla voidaan laskea jäähdyttämättömän rakennuksen kokonaisenergiankulutus. Jäähdytetyn talon energiankulutuksen laskentaa varten täytyy lämmitys- ja jäähdytysenergian tarve laskea dynaamista menetelmää käyttäen. Ohjeessa menetelmä esitellään yksinkertaistettuna laskentamenetelmänä, joka: ”ottaa huomioon oleellimmat energiankulutukseen vaikuttavat tekijät ja rakennuksen ominaisuudet Suomen olosuhteissa.” Ohjeen mukaisesta laskennasta saadaan lopulta ulos rakennuksen laskennallinen energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku [$\text{kWh}_E/\text{m}^2\text{a}$]) ja rakennuksen energiatehokkuusluokka. E-luku saadaan rakennuksen ostoenergiankulutuksesta käyttämällä energiamuotojen kertoimia, jotka on säädetty valtioneuvoston asetuksessa (788/2017) ja jakamalla rakennuksen lämmitetyllä nettoalalla. (Ympäristöministeriö, 2018b) Energiankulutuksen arviointiin on olemassa simulointityökaluja. Osa ohjelmistoista vaatii käyttäjältään CAD- ja ohjelmointiosaamista, joihinkin on tehty käyttäjäystävällinen käyttöliittymä. Kokonaisenergiankulutusta arvioidaan rakennuksen lämmitykseen, ilmanvaihtoon ja jäähdytykseen kuluvan sekä lämpimän käyttöveden, valojen ja muiden sähkölaitteiden kuluttaman energian perusteella. (Abd Rashid ja Yusoff, 2015) Level(s) – menetelmän mukaisessa laskennassa energiankulutus sisältää lämmitykseen, jäähdytykseen, ilmanvaihtoon, lämpimän käyttöveden tuottamiseen ja valaistukseen kuluvan energian (Dodd *ym.*, 2017). EN 15978 – standardin mukaan jos energiankulutuslaskelma sisältää käyttäjä sähköä (sähkölaitteiden kuten tietokoneet, pesukoneet, TV, yms. käyttämä sähkö), tulee se dokumentoida ja raportoida erikseen

(Suomen standardoimisliitto SFS, 2011). Standardien mukaisissa laskelmissa sähkölaitteiden käyttämää energiaa ei tulisi siis ottaa huomioon. Stephan, Crawford ja Myttenaeren (2012) mukaan dynaamisilla simulointityökaluilla saadaan tarkempia tuloksia energiankulutuksesta, mutta hankkeen alkuvaiheessa on suositeltavaa käyttää staattista laskentatapaa sen joustavuuden ja helppokäyttöisyyden vuoksi. Täysi dynaaminen simulointi on suositeltavaa suunnittelun kehittyneemmissä vaiheissa. Tällöin lämmityksen, jäähdytyksen ja muiden käytönajan energiankulutusten arvot voidaan korvata täsmällisemmällä tiedoilla. (Stephan, Crawford ja Myttenaere, 2012)

1.4 Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment, LCA)

Suuri osa tutkijoista ja päätöksentekijöistä on yhtä mieltä siitä, että rakennusalan ympäristövaikutuksia täytyy vähentää ja elinkaariarviointia (Life Cycle Assessment, LCA) pidetään hyvänä työkaluna päästövähennysten tavoittelussa (Röck *ym.*, 2018). LCA on vakiintunut tapa tuottaa tietoa tuotteen tai prosessin ympäristövaikutuksista sen koko elinkaaren ajalta (Säynäjoki *ym.*, 2017).

1.4.1 Standardit

Elinkaariarviointi perustuu lähes kaikilla aloilla ISO 14040 ja ISO 14044 –standardeihin. Niissä määritellään kehykset elinkaariarvioinnille. Rakennusalalla elinkaariarviointia ohjataan CEN/TC 350 –standardiperheen standardeissa. Näistä EN 15978, joka sisältää ympäristövaikutusten laskentaohjeet, on vakiintunut maailmanlaajuisesti rakennusalan elinkaariarvioinnin perustaksi. Lähes kaikkien rakennuksen ympäristöluokituksia määrittelevien tahojen arviointiperusteet lasketaan EN 15978:n ohjeilla. (Bionova Oy, 2017)

ISO (the International Organization for Standardisation) on maailmanlaajuinen kansallisten standardoimisjärjestöjen liitto. ISO 14000 –standardiperhe tarjoaa käytännön ohjeita ja työkaluja ympäristöasioiden hallintaan. ISO 14040 määrittelee periaatteet ja kehykset elinkaariarvioinnin suorittamiselle. ISO 14044 määrittelee tarkemmin elinkaariarvioinnin tekemisen vaatimukset. (Suomen standardoimisliitto SFS, 2006)

Euroopassa rakennuksen elinkaaren ympäristöpäästölaskenta perustuu CEN/TC 350 – standardiperheeseen. CEN/TC 350 – Sustainability of Construction Works – standardiperhe pyrkii edistämään kestävästä rakentamisesta Euroopassa ja kehittämään kansainvälisesti yhtenäisen menetelmän rakennustuotteiden ja rakennusten päästöjen mittaamiseen. CEN/TC 350 sisältää standardeja muun muassa rakennuksen hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten laskentaan ja ne ovat ydinosaamista vastaavia ISO 14040 ja 14044 – standardien kanssa. (Bionova Oy, 2017; Suomen standardoimisliitto SFS, 2017).

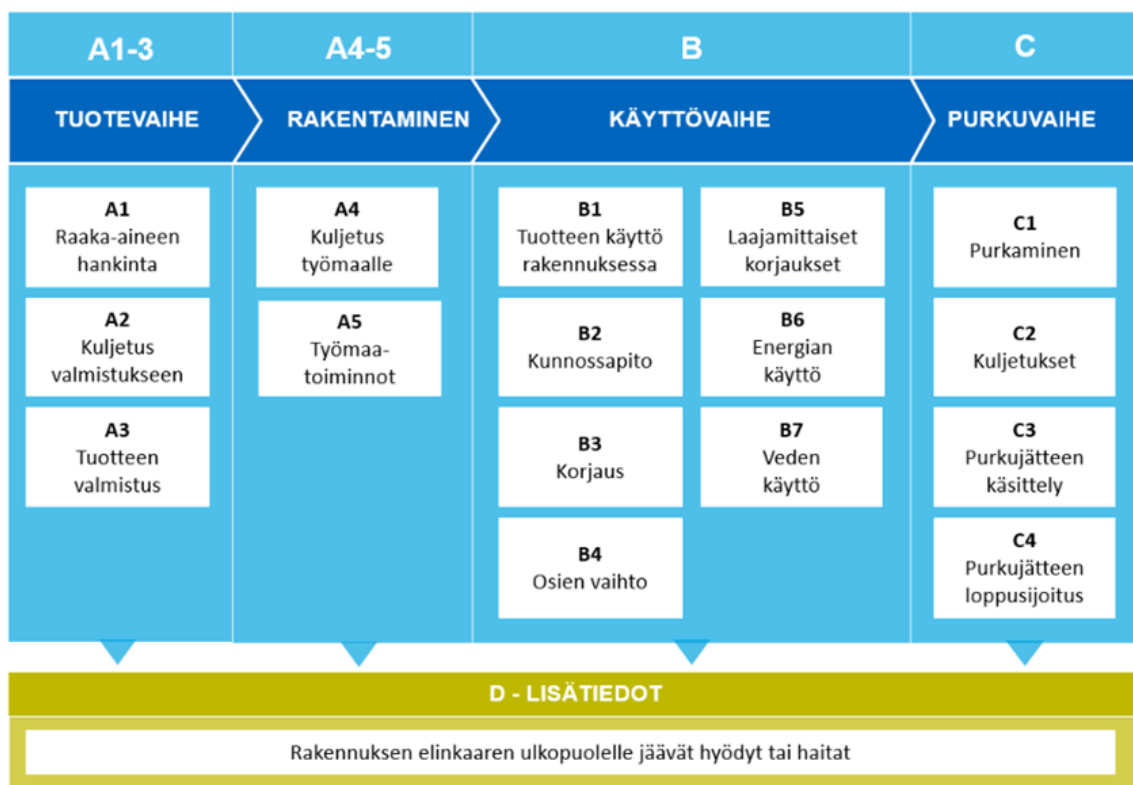
CEN/TC 350 – standardiperhe (Taulukko 1) määrittelee rakennuksen suoritustasoa kolmella osa-alueella, jotka kulkevat taulukossa vasemmalta oikealle: ympäristö, sosiaalinen ja taloudellinen suoritustaso. Taulukossa ylhäältä alaspäin kuljettaessa standardien laajuus pienenee. Ensimmäisellä tasolla olevat standardit kuvaavat yleisiä raameja, toisen tason standardit määrittävät tarkempia laskentatapoja ja alimman tason standardit määrittävät vaikutusten arviointia tuotetasolla. Taulukosta on korostettu tämän tutkimuksen kannalta merkittävät standardit. EN 15643-2 määrittelee raamit rakennuksen ympäristövaikutusten arviointiin ja EN 15978 määrittelee tarkasti vaikutusten laskentatavan. EN 15804:ssä määritellään rakennustuotteen ympäristöselosteen laadintatapa. EN 15804 päivitettiin vuonna 2013 muotoon EN 15804 + A1. A1 lisäsi standardiin liitteen C, joka sisältää CML-IA 2012 -tietokannan mukaiset karakterisointikertoimet vaikutusarviointivaiheen vaikutusluokille. EN 15643-4 määrittelee raamit rakennuksen kustannustehokkuudelle ja EN 16627 sisältää rakennuksen elinkaarikustannusten tarkan laskentatavan.

Taulukko 1. CEN/TC 350 - standardiperheen standardeja (mukaillen Suomen standardoimisliitto SFS, 2011, 2017).

Concept level	User and regulatory Requirements				
	Integrated Building Performance				
	Environmental Performance	Social Performance	Economic Performance	Technical Performance	Functional Performance
Framework level	<div>EN 15643-1 Sustainability of Buildings – Part 1: General Framework (TG)</div> <div><div>EN 15643-2 Assessment of Buildings – Part 2: framework for the assessment of environmental performance (WG1)</div><div>EN 15643-3 Assessment of Buildings – Part 3: framework for the assessment of social performance (WG5)</div><div>EN 15643-4 Assessment of Buildings – Part 4: framework for the assessment of economic performance (WG4)</div></div> <div>PrEN 15643-5 Assessment of building and Civil Engineering Works – Part 5: Framework on specific principles and requirements for civil engineering works (WG6)</div>			Technical Characteristics	Functionality
Works level	<div>EN 15978 Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method (WG1)</div> <div>EN 16309 Assessment of social performance of buildings – Calculation methodology (WG5)</div> <div>EN 16627 Assessment of economic performance of buildings – Calculation method (WG4)</div> <div>WI 00350028A Sustainability of construction works – Sustainability assessment civil engineering works – Calculation methods (WG6)</div>				
Product level	<div>EN 15804 Environmental Product Declarations – Core rules for product category of construction products (WG3)</div>	<div>(See Note Below)</div> <div>(See Note Below)</div> <div>Note At present, technical information related to some aspects of social and economic performance are included under the provision of EN 15804 to form part of the EPD.</div>			
	<div>EN 15942 Environmental Procurement Declarations – Communication format – Business (WG3)</div>				
	<div>CEN/TR 15941 Environmental Product Declarations – Methodology for selection and use of generic data (WG3)</div>				

1.4.2 Elinkaaren vaiheet

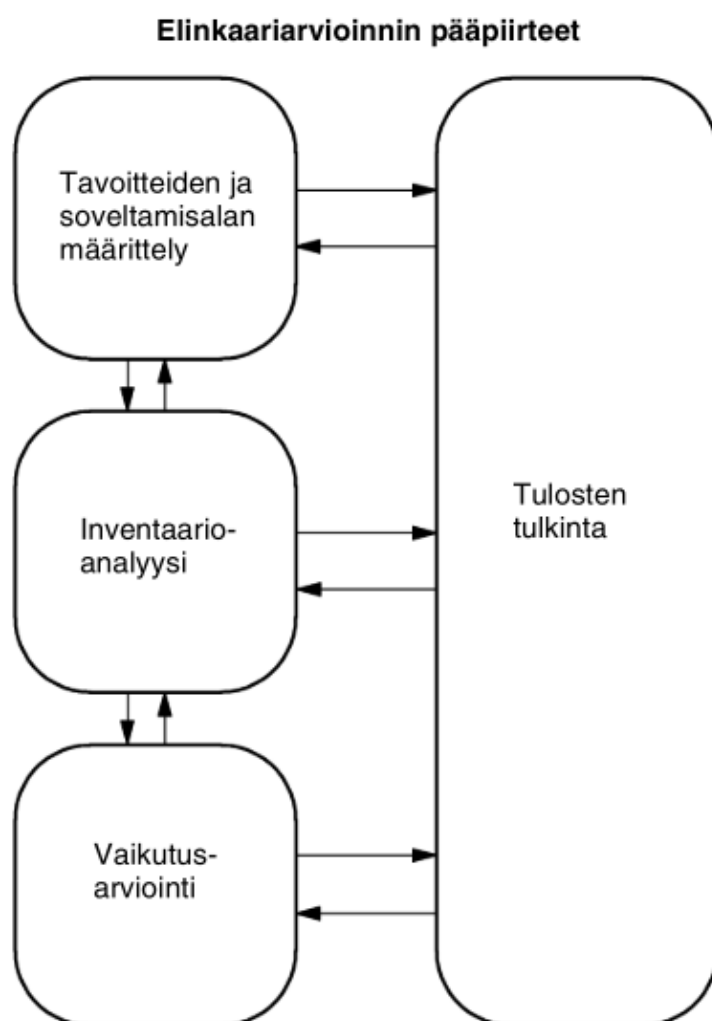
EN 15978 – standardin mukaan uudisrakennuksen elinkaariarvioinnin tutkittava laajuus sisältää kaikki rakennuksen valmistukseen ja ylläpitoon vaadittavat prosessit raaka-aineiden hankinnasta niiden loppusijoitukseen asti. Rakennuksen elinkaari on standardissa jaoteltu A - ennen käyttöä, B - käytön aikana, C - käytön jälkeen ja D – elinkaaren ulkopuoliset tiedot – kohtiin (Kuva 3). Jokaisessa kohdassa tutkitaan aiheutuvat ympäristövaikutukset vielä tarkemmin määriteltujen alaotsakkeiden mukaan. Standardissa määritellään erikseen jokaisen vaiheen tarkempi sisältö ja rajaukset. (Suomen standardoimisliitto SFS, 2011)



Kuva 3. Rakennuksen elinkaaren vaiheet (Ympäristöministeriö, (Bionova Oy, 2017) mukaan.)

1.4.3 Elinkaariarvioinnin rakenne

Elinkaariarvioinnissa huomioidaan tutkittavan tuotteen tai prosessin koko elinkaari: raaka-aineen hankinta, energian tuotanto, valmistus, käyttö ja loppusijoitus. Elinkaariarviointi jaetaan ISO 14040 – standardissa neljään vaiheeseen: tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, inventaarioanalyysi, vaikutusarviointi, tulosten tulkinta (Kuva 4). (Suomen standardoimisliitto SFS, 2006)



Kuva 4. Elinkaariarvioinnin pääpiirteet (Suomen standardoimisliitto SFS, 2006).

1.4.4 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely

Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely – vaiheessa määrätään elinkaariarvioinnin laajuus, yksityiskohtaisuus ja tarkasteltava ajanjakso. Tavoitteissa esitellään elinkaariarvioinnin käyttötarkoitus, syyt selvityksen tekemiselle, kohdeyleisö, jolle tuloksia on tarkoitus esitellä sekä mahdollinen aikomus esitellä tuloksia julkisessa vertailussa. Elinkaariarvioinnin soveltamisalaa määriteltäessä täytyy kertoa mitä tutkitaan, miten järjestelmä on rajattu, allokointimenettelyt, vaikutusarvioinnissa ja tulkinnassa käytettävät vaikutusluokat ja menetelmät, vaatimukset tiedoille, arvioinnissa tehdyt oletukset ja rajaukset, laatuvaatimukset lähtötiedoille, kriittisen arvioinnin tyyppi ja selvityksestä tehtävän raportin tyyppi ja muoto. (Suomen standardoimisliitto SFS, 2006)

1.4.5 Inventaarioanalyysi, LCI

Inventaarioanalyysi (Life Cycle Inventory analysis, LCI) tarkoittaa tiedon keräämistä ja laskentatapojen valintaa. Tiedon kerääminen sisältää tutkittavassa prosessissa syntyvien päästöjen luettelointia jokaisen yksikköprosessin osalta. Tietoja kerätään prosessin kaikista vaiheista ja niitä voidaan lajitella osakokonaisuuksiin: prosessiin tuotava energia ja raaka-aineet, prosessista saatavat tuotteet ja prosessissa syntyvät päästöt. Tiedonkeruuseen liittyy hankitun tiedon varmentaminen ja tiedon lähteen selvitys. Laskennalla muodostetaan koko tutkittavan prosessin päästöt, tuotokset sekä käytetyt raaka-aineet ja energia. Rakennustuotteen valmistamisessa syntyvät päästöt voidaan ilmoittaa ympäristöselosteessa (EPD, Environmental Product Declaration). EU ei velvoita valmistajaa ilmoittamaan rakennustuotteen kasvihuonekaasupäästöjä, mutta valmistaja voi tehdä tuotteestaan vapaaehtoisen EPD – ympäristöselosteen, jossa päästöt selvitetään. EN 15978 – standardin mukaisessa laskennassa tulee rakennustuotteiden päästöt olla määritetty EN 15804 + A1 – standardin mukaan. Rakennustietosäätiö RTS laatii ja hyväksyy RTS EPD – ympäristöselosteita. RTS EPD sisältää EN 15804 + A1 – standardissa ympäristöselosteen sisällöksi määrätyt tiedot. (Suomen standardoimisliitto SFS, 2006, 2014; Virkamäki *ym.*, 2017; Rakennustietosäätiö, 2018)

LCI – menetelmät voidaan jakaa karkeasti kolmeen ryhmään: Prosessianalyysi (Process), Ympäristölaajennettu panos-tuotos - analyysi (Environmentally Extended Input-Output, EEIOA) ja Hybridianalyysi (Hybrid). Inventaarioanalyysin muodostamisessa käytettävä

laskentakaava riippuu käytettävästä menetelmästä (Liite 4). Prosessianalyysi on vakiintunein ja eniten käytetty menetelmä. Sitä pidetään panos-tuotos – menetelmää tarkempana, mutta se on työläämpi ja vie enemmän aikaa. Prosessianalyysissä käytetään tietylle prosessille tai tuotteelle ominaisia tietoja, jolloin saavutetaan paras mahdollinen tarkkuus. Prosessianalyysissä tutkittava tuotejärjestelmä puretaan sarjaksi osaprosesseja, jotka kuvaavat tuotteen elinkaarta. Päästöt arvioidaan energia- ja massavirtoina jokaiselle yksikköprosessille erikseen. Jokaiselle yksikköprosessille voidaan määrittää tuote- ja sijaintikohtaiset päästötiedot. Tietojen kerääminen jokaiselle prosessille vaatii paljon resursseja ja tutkittavan järjestelmän laajuus täytyy aina rajata subjektiivisilla valinnoilla. Rajauksen ulkopuolelle jäävien prosessien vaikutuksia ei voida tietää, ellei niitä lasketa, mutta menetelmän työläyden vuoksi on tuotteiden toimitusketjuja mahdotonta arvioida täysin kattavasti, joten rajoituksia joudutaan tekemään aina. Rakennusalan monimutkaisuuden vuoksi on arvioitu, että paras ymmärrys ympäristövaikutuksista voitaisiin saavuttaa prosessianalyysillä. Rakennuksessa voi kuitenkin olla tuhansia rakennusosia ja kattavinkin prosessianalyysi jättää todennäköisesti osan niistä huomiotta. Prosessianalyysit yleensä aliarvioivat päästöjen suuruuden. (Suh *ym.*, 2004; Bilec *ym.*, 2006; Lenzen ja Crawford, 2009; Antikainen, 2010; Säynäjoki, Heinonen ja Junnila, 2011; Jiang *ym.*, 2014; Abd Rashid ja Yusoff, 2015; Pöyry *ym.*, 2015; Säynäjoki *ym.*, 2017; Crawford *ym.*, 2018).

Panos-tuotos – analyysin kehitti Wassily Leontief 1930 – luvulla alun perin kansantalouden rakenteelliseen tutkimukseen. Panos-tuotos – analyysissä kansantalouden eri sektoreiden välisten rahallisten vuorovaikutussuhteiden avulla lasketaan, paljonko tietty toimiala tarvitsee toisten toimialojen tuotteita. Tämän avulla voidaan edelleen laskea mitä kansantalouden on valmistettava tietyn tuotteen valmistamiseksi. Panos-tuotosmallien käyttämiseksi elinkaariarviointiin, täytyy niihin lisätä ympäristölaajennus, jotta ne sisältävät rahamittaisten tilien lisäksi myös ympäristötilejä (tiedot päästöistä ja luonnonvarojen käytöstä). Kansalliset tilastokeskukset keräävät tietoja panos-tuotos – analyysiä varten, joten panos-tuotos – arvioinnit ovat kokonaisvaltaisia eikä niihin liity rajoituksista johtuvaa virhettä. Joidenkin maiden panos-tuotostaulukoita on mahdollista käyttää laskentaohjelmistoissa tietokantoina. Jos ympäristölaajennettuja panos-tuotos – tietokantoja on saatavilla, panos-tuotos – analyysi on suhteellisen nopeaa tehdä ja sillä saadaan huomioitua koko järjestelmän laajuus, joka prosessianalyysillä on mahdotonta saavuttaa. Panos-tuotos – arviointia pidetään prosessianalyysiä kattavampana, mutta

siihenkin liittyy epävarmuustekijöitä. Jokainen teollisuuden sektori sisältää useampia sektoreita, joilla voi olla erilaiset ympäristövaikutukset, joten tietyn sektorin päästöt on painotettu keskiarvo siihen sisältyvistä sektoreista. Keskiarvotiedot johtavat myös oletukseen, että ympäristövaikutusten kansalliset keskiarvot pitävät paikkansa kaikille tietyn sektorin tuotteille. Panos-tuotos – analyysi perustuu oletukseen, että rahavirratt edustavat hyvin kansantalouden fyysisiä virtoja. Esimerkiksi, että yhden dollarin panos saman sektorin kahteen eri tuotteeseen vaatii saman verran resursseja. Panos-tuotos – analyysissä oletetaan myös, että ympäristövaikutukset korreloivat kustannusten tapaan lineaarisesti, joka voi toisinaan olla kaukana totuudesta. Panos-tuotos – tiedot ovat sektorikohtaisia koosteita, joten tietyn tuotteen arviointi tai saman sektorin eri toimintojen vertailu on vaikeaa. Panos-tuotos – analyysin on arvioitu soveltuvan parhaiten talouden tai teollisuuden kokonaisuuksien arviointiin. (Suh *ym.*, 2004; Bilec *ym.*, 2006; Lenzen ja Crawford, 2009; Antikainen, 2010; Säynäjoki, Heinonen ja Junnila, 2011; Jiang *ym.*, 2014; Abd Rashid ja Yusoff, 2015; Pöyry *ym.*, 2015; Säynäjoki *ym.*, 2017; Crawford *ym.*, 2018).

Hybridianalyysit pyrkivät yhdistämään prosessi – ja panos-tuotos – analyysien vahvuudet ja minimoimaan niiden heikkoudet. Hybridianalyyseillä on arvioitu saatavan täydellisempiä ja tarkempia arviointeja. Nykyiset ISO-standardit perustuvat prosessianalyysiin, mutta ne eivät estä panos-tuotos – mallin käyttöä tuotejärjestelmän joidenkin osien kuvaamisessa. Hybridimenetelmiä käytetään vielä verrattain vähän, johtuen niiden vähäisestä standardoinnista ja työkalujen ja ohjelmistojen puutteesta. Hybridimenetelmiin ei ole ohjeita LCA standardeissa, eivätkä LCA-ohjelmistot tue hybridimenetelmien käyttöä. Hybridianalyyseissä yhdistetään prosessi- ja panos-tuotos – data. Menetelmät eroavat toisistaan tavassa, jolla data yhdistetään. Hybridianalyyseissä yhdistetään tyypeiltään hyvin erilaisia tietoja, mikä on vaikeuttanut hybridimenetelmien käyttöä laskentaohjelmistoissa. Crawford *ym.* (2018) tutkivat kirjallisuudessa mainittuja hybridi-LCI menetelmiä ja löysivät neljä päämenetelmää: Kerrostettu (Tiered), Polunvaihto (Path Exchange), Matriisin Laajennus (Matrix Augmentation) ja Integroitu (Integrated). (Suh *ym.*, 2004; Bilec *ym.*, 2006; Lenzen ja Crawford, 2009; Antikainen, 2010; Säynäjoki, Heinonen ja Junnila, 2011; Jiang *ym.*, 2014; Abd Rashid ja Yusoff, 2015; Pöyry *ym.*, 2015; Säynäjoki *ym.*, 2017; Crawford *ym.*, 2018).

Inventaariotiedon hankkiminen vaatii paljon aikaa ja resursseja, jonka vuoksi tiedonkeruussa voidaan käyttää tietokantoja. Tietokannat sisältävät inventaariotietoja tuotteista ja palveluista ja ne voivat sisältää tietoja myös vaikutusarviointimenetelmistä. Tietokanta voi sisältää tietoja ainoastaan yhden materiaalin tai tuotteen valmistamisesta tai se voi sisältää usean eri toimialan tietoja. Ympäristölaajennetuista panos-tuotosmalleista on myös olemassa tietokantoja. Antikaisen (2010) mukaan maksullisista kattavista tietokannoista ylivoimaisesti käytetyin on Ecoinvent, joka sisältää tiedot yli 4 000 prosessista ja useista vaikutusarviointimenetelmien tuloksista. Tietokannat voivat sisältää tiedot ainoastaan koko prosessista siten, että eri tuotantovaiheiden vaikutuksia ei voida arvioida. Toiset tietokannoista sisältävät tiedot jokaiselle yksikköprosessille, jolloin käyttäjä voi muokata tuotantoketjuja. Usein tietokannat sisältävät tuotteiden ja palveluiden keskiarvotiedot, joita voidaan käyttää, jos tarkkaa prosessikohtaista tietoa ei ole saatavilla. (Antikainen, 2010).

1.4.6 Vaikutusarviointi, LCIA

Vaikutusarviointivaiheessa (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) määritetään:

- **tutkittavat vaikutusluokat**

Esimerkiksi: uusiutumattomien fossiilisten energiavarojen ehtyminen, uusiutumattomien ei-eloperäisten mineraalivarojen ehtyminen, maaperän ja vesien happamoituminen, otsonikato, ilmaston lämpeneminen, rehevöityminen, valokemiallinen otsonin muodostuminen

- **vaikutusluokkien indikaattorit**

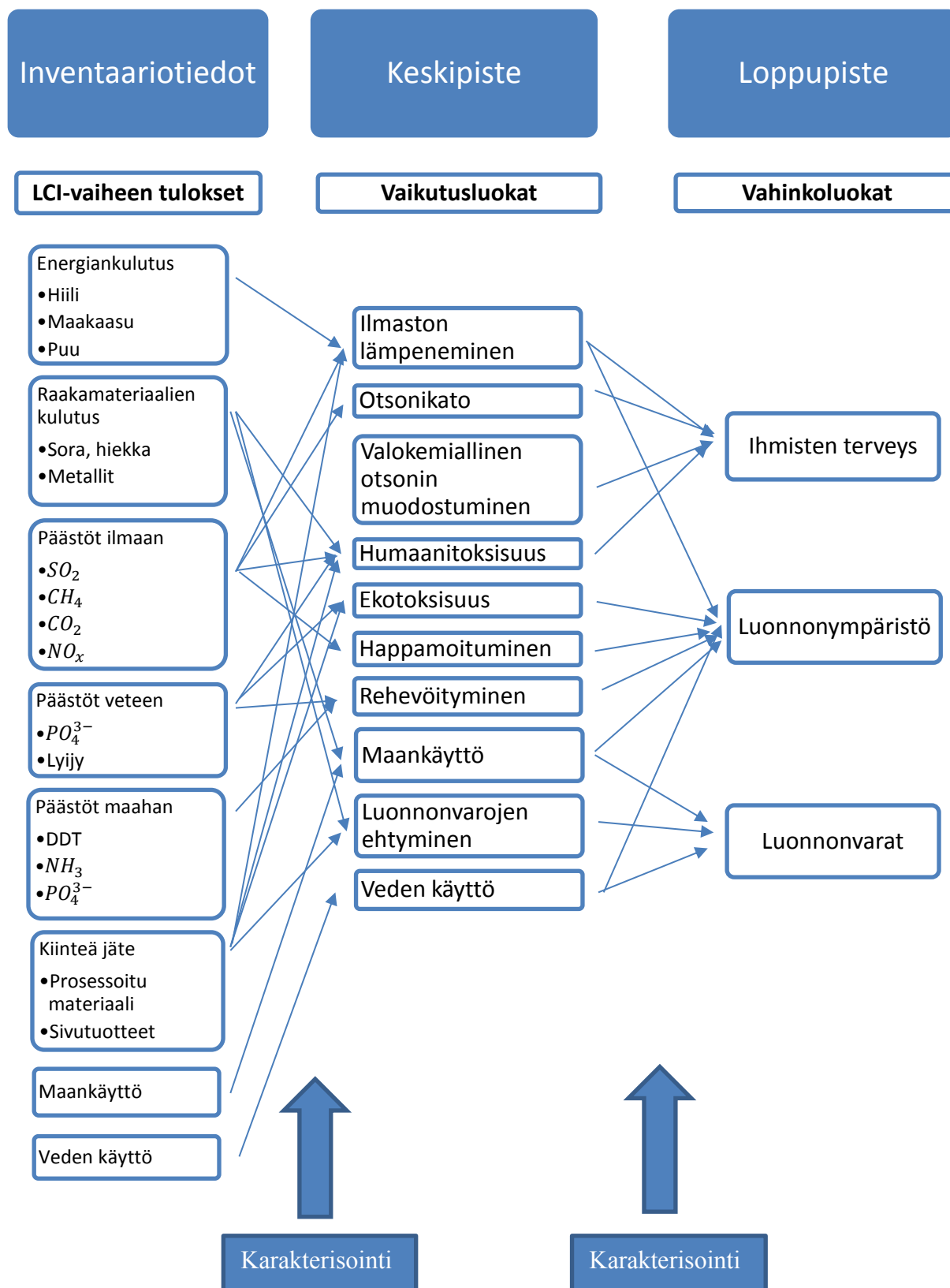
Esimerkiksi: uusiutumattomien mineraali- ja energiavarojen ehtyminen, maaperää ja vesistöjä happamoittavat päästöt, yläilmakehän otsonia tuhoavien aineiden päästöt, kasvihuonekaasupäästöt, rehevöitymistä aiheuttavat päästöt, valokemiallista otsonia alailmakehässä muodostavien aineiden päästöt)

- **karakterisointikertoimet**

Eri aineiden ympäristövaikutukset määritellään valitun indikaattorin yksikössä.

Esimerkki: Valitaan tutkittavaksi vaikutusluokaksi ilmaston lämpeneminen. Ilmaston lämpenemistä kuvaavan vaikutusluokan indikaattori on kasvihuonekaasupäästöt. Kasvihuonekaasupäästöjen suure on hiilidioksidiekvivalentti, jonka yksikkö on

[kgCO₂e]. Hiilidioksidin karakterisointikerroin on tällöin 1, mutta esimerkiksi metaanin karakterisointikerroin on 25. Karakterisointikerroin siis kuvaa metaanin hiilidioksidia suurempaa vaikutusta ilmastoon lämpenemiseen. Inventaarioanalyysin tulokset sijoitetaan vaikutusluokkiin ja näin voidaan arvioida ympäristövaikutusten merkittävyyttä. (Suomen standardoimisliitto SFS, 2006) Yksinkertaistetussa ympäristömekanismissa inventaariotiedot kohdistetaan keskipisteen vaikutusluokkiin ja edelleen loppupisteen vahinkoluokkiin (Kuva 5). Inventaariotietojen vaikutus keskipisteen vaikutusluokkien arvoihin saadaan määräämällä karakterisointikertoimet. Kun keskipisteet mallinnetaan edelleen loppupisteiksi, tarvitaan jälleen karakterisointia. Kolmannet karakterisointikertoimet, joiden avulla inventaariotiedot voidaan suoraan mallintaa loppupisteisiin, saadaan kahden aikaisemman tulona. (Van Hoof *ym.*, 2013; Souza, Teixeira ja Ostermann, 2015).



Kuva 5. Esimerkki yksinkertaistetusta ympäristömekanismista. (Mukaillen Souza, Teixeira ja Ostermann, 2015).

Vaikutusarvioinnissa materiaali- ja energiavirtojen ympäristövaikutukset määrätään erilaisiin ympäristövaikutusluokkiin. Karakterisointikertoimia käytetään määrittämään jokaisen osakokonaisuuden vaikutuksia kussakin vaikutusluokassa. (Cabeza *ym.*, 2014) Vaikutusarviointimenetelmiä on kehitetty pelkästään Eurooppaan yli 50 kappaletta. Bueno *ym.* (2016) mukaan kaikilla menetelmillä ei saada yhteneviä tuloksia ja voi olla mahdollista saada todellisuutta parempia tuloksia valitsemalla tutkittavaan tilanteeseen sopivampi menetelmä. Menetelmien väliset erot johtuvat karakterisointimalleista; samalle materiaalille on määrätty erilaiset painokertoimet tai samaan vaikutusluokkaan voidaan eri menetelmissä ottaa huomioon vaikutukset eri materiaaleista. Eroavaisuuksien syitä voidaan joissain tapauksissa selittää maantieteellisellä sijainnilla. Päästöjen vaikutukset ympäristöön voivat olla erilaiset eri puolilla maailmaa. Toisaalta vaikutukset voivat muuttua samassakin paikassa ajan kuluessa. LCA – tutkimuksessa tulisi käyttää uusinta ja mahdollisimman samanlaiseen kontekstiin luotua LCIA – menetelmää. (Bueno *ym.*, 2016) EN 15804 + A1 – standardin mukaisissa laskelmissa tulee standardin mukaan käyttää CML-IA 2012 – tietokannan mukaisia LCIA -karakterisointikertoimia (Suomen standardoimisliitto SFS, 2014).

Vaikutusarviointimenetelmät voidaan jakaa kahteen mallinnustapaan: keskipiste (midpoint) – ja loppupiste (endpoint) – mallinnus. Keskipistemallinnuksessa käytetään vaikutusluokkaindikaattoreita, jotka sijaitsevat alkutilanteen ja loppupisteen välissä. Keskipiste on ympäristömekanismin piste, jossa voidaan laskea karakterisointikertoimet kuvaamaan inventaariotietojen suhteellista painoarvoa tietyssä vaikutusluokassa. Keskipistemenetelmissä indikaattoreiden määrä vaihtelee riippuen käytettävästä menetelmästä. Loppupistemenetelmä arvioi keskipistemenetelmän vaikutusluokkien vaikutuksia ihmisten terveyteen ja ekosysteemiin loppupisteissä, joita pidetään yleisesti helpommin ymmärrettävinä. Loppupistemenetelmissä käytetään aina kolmea tai neljää loppupistettä, yleisimmin ihmisten terveys, luonnonympäristö ja luonnonvarat. Loppupisteistä käytetään myös nimitystä ”suojeltavat kohteet” ja englanniksi ”Damage categories” eli ”Vahinkoluokat”. Keskipistemenetelmän on sanottu olevan luotettavampi, loppupistemenetelmä on ytimekkäämpi ja päätöksenteon kannalta helpompi ymmärtää. Osa vaikutusarviointimenetelmistä sisältää sekä keskipiste-, että loppupistemallinnuksen ja joihinkin menetelmiin on kehitetty myös painokertoimia, joiden avulla tulokset voidaan esittää yhdellä vaikutusindikaattorilla. Yhden indikaattorin menetelmät ovat kasvattaneet suosiotaan yksinkertaisuutensa vuoksi, mutta ne voivat jättää piiloon muita

ympäristöongelmia, jotka useamman indikaattorin menetelmällä tulisivat ilmi. Antikainen (2010) keräsi tietoja eri vaikutusarviointimenetelmien ominaisuuksista (Taulukko 2). (Bare *ym.*, 2000; Antikainen, 2010; Van Hoof *ym.*, 2013).

Taulukko 2. Vaikutusarviointimenetelmien yleistietoja (Mukaillen Antikainen, 2010).

Nimi	Mallinnustapa	Karakterisointi, vaikutusluokkien lkm	Maantieteellinen kattavuus
CML	Keskipiste	Keskipiste: noin 20	Maailma
EDIP97	Keskipiste	Keskipiste: 8 + työympäristö	Maailma
EDIP2003	Keskipiste	Keskipiste: 9	Eurooppa
LUCAS	Keskipiste	Keskipiste: 11	Kanada
TRACI	Keskipiste	Keskipiste: 10	USA, Pohjois-Amerikka
MEEuP	Keskipiste	Useita luokkia	Eurooppa
Eco-Indicator99	Loppupiste	Loppupiste: 3 (sis. Keskipiste: 11)	Eurooppa
EPS 2000	Loppupiste	Loppupiste: 4 (sis. Keskipiste: 16)	Maailma
ReCiPe	Keskipiste Loppupiste	Keskipiste: 19, Loppupiste: 3	Eurooppa
Impact2002+	Keskipiste Loppupiste	Keskipiste: 13, Loppupiste: 4	Eurooppa
LIME2	Keskipiste Loppupiste	Keskipiste: 15, Loppupiste: 4	Japani

1.4.7 Tulosten tulkinta

Tulosten tulkinta – vaiheessa inventaarioanalyysin ja vaikutusarvioinnin tulokset esitetään aiemmin määrätyn tavoitteen ja soveltamisalan mukaisesti. Elinkaariarvioinnin tulokset raportoidaan EN15978 - standardin mukaan helposti ymmärrettävästi, täydellisesti ja johdonmukaisessa muodossa. Tulokset voidaan esittää päätöksentekijöille ja niiden avulla voidaan tehdä johtopäätöksiä ympäristövaikutusten suuruudesta ja

keskeisimmistä tekijöistä. Tulkinnessa tulee korostaa, että vaikutusarvioinnin tulokset osoittavat potentiaalisia ympäristövaikutuksia eivätkä ennusta todellisia vaikutuksia vaikutusluokan loppupisteisiin. (Suomen standardoimisliitto SFS, 2006, 2011).

1.4.8 Elinkaariarvioinnin soveltuvuus rakentamisen päästöjen tutkimiseen

LCA:n soveltuvuutta rakennuksen ympäristöystävällisyyden arviointiin on myös kyseenalaistettu. Säynäjoki ym. (2017) totesivat tutkimuksessaan, että alalla käytettävät LCA – menetelmät eivät vielä ole riittävän vakiintuneita ja yhteneväisiä, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia. Tutkimuksessa vertailtiin tuloksia 116:sta rakennukselle tehdystä LCA – tutkimuksesta ja todettiin suurimman ja pienemmän tuloksen eron olevan 20 -kertainen. Tutkimuksen mukaan erot eivät johdu rakennusten eroavaisuuksista, vaan suurimmalta osin LCA – menetelmien eroista ja laskentaa tekevän tahon valinnoista. Yksi tällaisista valinnoista on rakennuksen elinkaaren pituus. Eroavaisuudet elinkaarten pituuksissa laskelmien välillä vaikeuttaa niiden vertailukelpoisuutta. Tutkimuksen mukaan rakennus on niin monimutkainen kokonaisuus, että täydellisen LCA – laskelman tekeminen vaatisi äärettömän määrän tietoa ja on siksi käytännössä mahdotonta toteuttaa. Tutkimuksessa todetaan, että olemassa olevat LCA – tutkimukset eivät tarjoa riittävää taustatietoa päätöksentekoa varten, ellei ole kunnollista ymmärrystä tutkimuksessa tehdyistä oletuksista ja tietoa käytetystä menetelmästä. Koska laskentamenetelmissä on eroavaisuuksia ja laskijalla mahdollisuus tehdä valintoja laskennan aikana, peräänkuuluttaa tutkimus alalle läpinäkyvyyttä. (Säynäjoki ym., 2017).

Heinonen ym. (2016) tutkivat kasvihuonekaasupäästöt – indikaattorin kyvykkyyttä kuvata rakennuksen kaikkia ympäristövaikutuksia. Tutkimuksessa käytettiin ReCiPe keskipistemenetelmää, joka sisältää 18 vaikutusluokan indikaattoria, jotta saavutettiin laaja vaikutusluokkavalikoima. Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia yhteyksiä kasvihuonekaasupäästöjen ja muiden ympäristövaikutusluokkien välillä. Tutkimuksessa todettiin, että kasvihuonekaasupäästöt voisi olla suhteellisen hyvä indikaattori kahdeksalle tutkitulle vaikutusluokalle, mutta yhdeksässä vaikutusluokassa se ei kuvaisi ympäristövaikutuksia hyvin. Tutkimus esittää, että sellaiset materiaalit ja rakennuksen osat, jotka usein jätetään huomiotta rakennusten LCA-laskennassa, muodostavat merkittävän osan päästöistä useissa tutkituissa vaikutusluokissa. Esimerkiksi puun osuus päästöistä vaihteli 5 – 97 % välillä riippuen vaikutusluokasta. Tutkimuksessa todetaan,

että yhden vaikutusluokan LCA:ta, kuten esimerkiksi kasvihuonekaasupäästöjen arviointia, voidaan tietyin rajauksin käyttää yleisempänä indikaattorina kaikille ympäristövaikutuksille. (Heinonen *ym.*, 2016).

Häfliger *ym.* (2017) osoittivat tutkimuksessaan, että laskentaan liittyvät epävarmuudet vaikuttavat merkittävästi rakennuksen LCA – laskennan tuloksiin. Tutkimuksessa tutkittiin neljän tulosten hajontaa ja epävarmuutta aiheuttavan tekijän vaikutuksia: materiaalien päästöjen määrittämiseen käytetty tietokanta, laskennan rajausten määrittäminen, materiaalien käyttöiät ja rakennuksen käyttöikä. Tutkimuksen mukaan epävarmuus materiaalien arvioiduissa käyttöiäissä voi johtaa suureen hajontaan rakennuksen LCA – laskennassa. Tämän vuoksi Häfliger *ym.* ehdottaa, että tietokantoja tulisi yhtenäistää, jotta voitaisiin päättää kuinka materiaalien käyttöiät määritellään. Tietokantojen vertailussa neljän tutkitun rakennuksen ympäristövaikutusten keskinäiset suhteet pysyivät samana, mutta tulosten suuruuksissa oli selkeitä eroja. EPD – tietokantojen avulla lasketut tulokset olivat noin 20 % kahden muun tietokannan (Ecoinvent, KBOB) tuloksia pienemmät. Tutkimus huomauttaa, että lähes kaikkien rakennusmateriaalien kasvihuonekaasupäästöt olivat EPD – tietokannassa pienemmät kuin KBOB – tietokannassa. Ikkunoiden ja ovien, eristemateriaalien ja puutuotteiden huomattiin olevan kaikkein herkimpiä tietokantavalinnalle. Sementti-, betoni- ja muuraustuotteiden huomattiin olevan herkkiä ainoastaan rakennuksen tutkittavalle käyttöiälle. Tutkimus toteaa, että mikäli rakennuksen tutkittava käyttöikä valitaan suureksi, rakennuksen ympäristövaikutusten arviointi keskittyy eristysmateriaaleihin ja ikkunoihin ja oviin. Vastaavasti, jos valitaan lyhempi tutkittava käyttöikä, on rakennuksen ympäristövaikutuksia pienentäessä pääpaino betoni- ja muurausmateriaaleissa. (Häfliger *ym.*, 2017)

Garcia-Ceballos *ym.* (2018) tutkivat LCA:n soveltuvuutta rakentamisalan päätöksenteon tueksi ympäristöystävällisten ja energiatehokkaiden ratkaisuiden valinnassa. Tutkimuksessa selvitettiin miten LCA:n avulla kyetään löytämään usean vaihtoehdon joukosta ympäristöystävällisin, energiatehokkain ja kustannustehokkain rakennevaihtoehto elinkaaren kaikissa vaiheissa. Vertailuun valittiin kolme Malagan (Espanja) kaupungin käytetyintä asuinrakennuksen ulkoseinän eristemateriaalia. Vaihtoehtojalle suoritettiin yksinkertaistettu LCA – laskenta, jossa käytön aikaista energiankulutusta ei huomioitu, sekä täydellinen LCA, jossa eristemateriaalin vaikutus

energiankulutukseen otettiin myös huomioon. Tutkimus osoittaa, että yksinkertaistetulla laskennalla voidaan analysoida ympäristövaikutuksia tuote-, rakentamis- ja purkuvaiheessa. Täydellisessä LCA – tutkimuksessa saadaan selville kuinka eri rakennusmateriaalit vaikuttavat seinäelementin koko elinkaareen. Tutkimus osoittaa, että rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi on tärkeää yhdistää jo olemassa oleviin energiatodistuksiin myös LCA – laskentaa. (Garcia-Ceballos, de Andres-Díaz ja Contreras-Lopez, 2018)

1.5 Elinkaarikustannukset (Life Cycle Cost, LCC)

1.5.1 Investointikustannus

Tähän tutkimukseen valittiin hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten lisäksi kolmanneksi vertailumittariksi myös investointikustannus. Investointikustannus otetaan huomioon elinkaarikustannuksissa, mutta se haluttiin myös erottaa omaksi mittariksi vertailua varten. Rakentamisvaiheen kustannuksiin lasketaan EN 16627 mukaan elinkaaren vaiheet A1-A5, jolloin siihen sisältyy materiaalien hankinnasta ja kuljetuksesta syntyvät, ja kaikki rakentamisen aikana sekä suunnittelusta, että rakentamisesta syntyvät kustannukset (Suomen standardoimisliitto SFS, 2015). Mäenpään (2014) mukaan hankesuunnitteluvaiheen kustannusarviointiin rakennushankkeissa käytetään Suomessa pääosin kahta tapaa: tavoitekustannusmenettelyä tai rakennusosa-arviota (Mäenpää, 2014). Sahlbergin (2016) mukaan hankkeen suunnitteluvaiheesta riippuen voidaan elinkaarikustannuslaskentaa suorittaessa rakentamisen kustannuksina käyttää tavoitekustannus- tai rakennusosa-arviomenetelmällä laskettuja tai saatuihin tarjouksiin perustuvia hintoja (Sahlberg, 2016).

Tavoitehintamenettely on tuotenimi (Haahtela-kehitys Oy), joka tarkoittaa rakennushankkeen hinnan määrittystä HAAHTELA-nimikkeistön™ mukaisella toimintaja tilatasolla. Menetelmässä määritellään hankkeen tilaohjelma, eli luettelo rakennukseen tulevista tiloista ja niiden suuruuksista. Rakennusosa-arvio on tuotenimi (Haahtela-kehitys Oy), joka tarkoittaa rakennuksen hinnan arviointia nimikkeistön mukaisten rakennusosien mukaan. Rakennusosien määrät mitataan rakennushinnastossa esitettyjen mittausperusteiden mukaan. Määrämittauksessa lasketaan kaikkien nettoalaan luettavien tilojen rakennusosien määrät. Rakennusosien hinnat määritellään

rakennusosahinnastossa. (Haahtela ja Kiiras, 2014). Rakennusosa-arvio on näistä työläämpi menetelmä. Suunnittelun alkuvaiheessa tavoitekustannusmenettely on sopiva menetelmä saada hankkeelle tavoitekustannus. (Mäenpää, 2014).

1.5.2 Elinkaarikustannus

Rakennushankkeen investointikustannuksella on suuri vaikutus päätöksenteossa. Rakennus kuitenkin aiheuttaa kustannuksia sen elinkaaren kaikissa vaiheissa ja kustannusten optimointi hankintavaiheessa voi aiheuttaa suuremmat kustannukset rakennuksen elinkaaren muissa vaiheissa. (Schmidt ja Crawford, 2018). Sahlbergin (2016) mukaan rakennushankkeissa tullaan tulevaisuudessa kiinnittämään yhä enemmän huomiota investointikustannusten laskennan lisäksi myös elinkaarikustannusten arviointiin. Hänen mukaansa Suomessa elinkaarikustannusten laskentaan ei ole yleisesti käytössä olevaa tapaa ja alan kirjallisuudessa investointi- ja elinkaarikustannusten termejä käytetään sekaisin ja epäselvästi. (Sahlberg, 2016). Schmidt ja Crawfordin (2018) mukaan rakennuksen taloudellisuuden arviointiin LCC on yleisesti käytetty työkalu (Schmidt ja Crawford, 2018). Elinkaarikustannuslaskenta (LCC) on keino arvioida rakennuksen koko elinkaaren aikana syntyviä kokonaiskustannuksia yhteismitallisella tavalla. Sitä ei tule rinnastaa kannattavuuslaskentaan, sillä elinkaarikustannuslaskenta ei arvioi hankkeen kannattavuutta, vaan rakennuksen koko elinkaaren aikana syntyviä kokonaiskustannuksia. (Green Building Council Finland, 2013). Euroopassa elinkaarikustannusten laskenta pohjautuu EN 15643-4 – standardiin, joka määrittelee kehykset rakennuksen taloudellisen suoritustason arviointiin. Standardin mukainen elinkaarikustannusten laskenta seuraa pääpiirteiltään ympäristövaikutusten laskentamallia, jossa kustannukset määritetään erikseen kaikille elinkaaren vaiheille. Elinkaaren vaiheisiin on ympäristövaikutuksista poiketen lisätty ”A0 – Ennen rakentamista”, jossa huomioidaan muun muassa tontin hankinnasta ja hankkeen suunnittelusta syntyvät kustannukset. Suurin eroavaisuus ympäristövaikutusten laskentaan on eri ajankohtina syntyneiden kustannusten muuttaminen yhteismitalliseen nettonykyarvoon diskonttauskorolla. EN 16627 – standardissa määritellään elinkaarikustannusten laskentatapa. Kustannukset lasketaan ensin ilman diskonttausta tai indeksisidonnaisuutta. Tästä saadaan nimellisarvo. LCC – analyysin standardimittari on nettonykyarvomenetelmä (NPV). Nettonykyarvomenetelmässä valitulla diskonttauskorolla on valtava merkitys laskennan tuloksiin, koska sillä määritetään

kaikkien tulevaisuudessa tapahtuvien kustannusten nykyarvo. Suuremmalla diskonttauskorolla myöhemmin syntyvien kulujen merkitys kokonaiskustannuksissa pienenee. (Suomen standardoimisliitto SFS, 2012, 2015; Green Building Council Finland, 2013)

1.6 Tietomallin hyödyntäminen elinkaariarvioinnissa

Röck ym. (2018) pyrkivät tutkimuksellaan näyttämään, kuinka rakennuksen tietomalliin (Building Information Model, BIM) yhdistetty elinkaariarviointi voi antaa suunnittelijoille vapauden keskittyä konseptisuunnitteluun ja saada samalla tietoa suunnitteluratkaisuiden ympäristövaikutuksista. Tutkimuksessa esitetään keino esittää LCA – laskennan tulokset visuaalisesti yhdistämällä ne rakennuksen tietomalliin: värjäämällä rakennuksen osat tietomallissa eri väreillä sen mukaan, kuinka suuren osuuden koko rakennuksen ympäristövaikutuksista kyseinen osa tuottaa tai sen mukaan kuinka suuri ero osan materiaalivaihtoehtoilla on ympäristövaikutuksiin, voidaan helposti ja nopeasti osoittaa suunnitelmasta kohdat, joissa on suurin potentiaali ympäristövaikutusten vähentämiselle. Integroimalla LCA – laskenta rakennuksen tietomalliin, voidaan tutkimuksen mukaan rakennusmateriaalien ympäristövaikutuksia vertailla kätevästi jo suunnittelun alkuvaiheessa. Tutkimuksessa näytetään, että tietomallista voidaan myös osoittaa suunnitteluratkaisuiden ongelmakohdat ympäristövaikutusten kannalta. Tutkimus toteaa, että esitetty metodi helpottaa LCA:n käytettävyyttä työkaluna suunnittelun ohjauksessa. (Röck ym., 2018)

Bueno ja Fabricio (2018) tutkivat BIM-ohjelmistoon integroidun LCA-laskentatyökalun yksinkertaistusten vaikutuksia LCA – laskennan tuloksiin. Tutkimuksen mukaan BIM-ohjelmistoon integroituun työkaluun on LCA – laskentaa jouduttu yksinkertaistamaan, jotta sitä voi käyttää myös suunnittelija, jolla ei ole asiantuntemusta LCA – laskennasta. Tutkimuksessa huomattiin, että BIM-LCA – työkalussa käyttäjä näkee ainoastaan laskennan tulokset, eikä laskennan vaiheita ole oikeastaan mahdollista nähdä tai muokata. Tästä syystä laskentaan liittyvien ongelmien ratkaiseminen tai niiden syiden löytäminen on tutkimuksen mukaan vaikeaa. Tutkimuksessa verrattiin BIM-ohjelmistoon integroidulla LCA-työkalulla laskettuja tuloksia LCA-laskentaohjelmistolla tehtyyn täydelliseen LCA – laskentaan ja todettiin, että tulokset eivät ole yhtenäisiä. Tutkimuksessa todetaan erojen johtuvan osittain BIM-liitännäisen kyvyttömyydestä ottaa

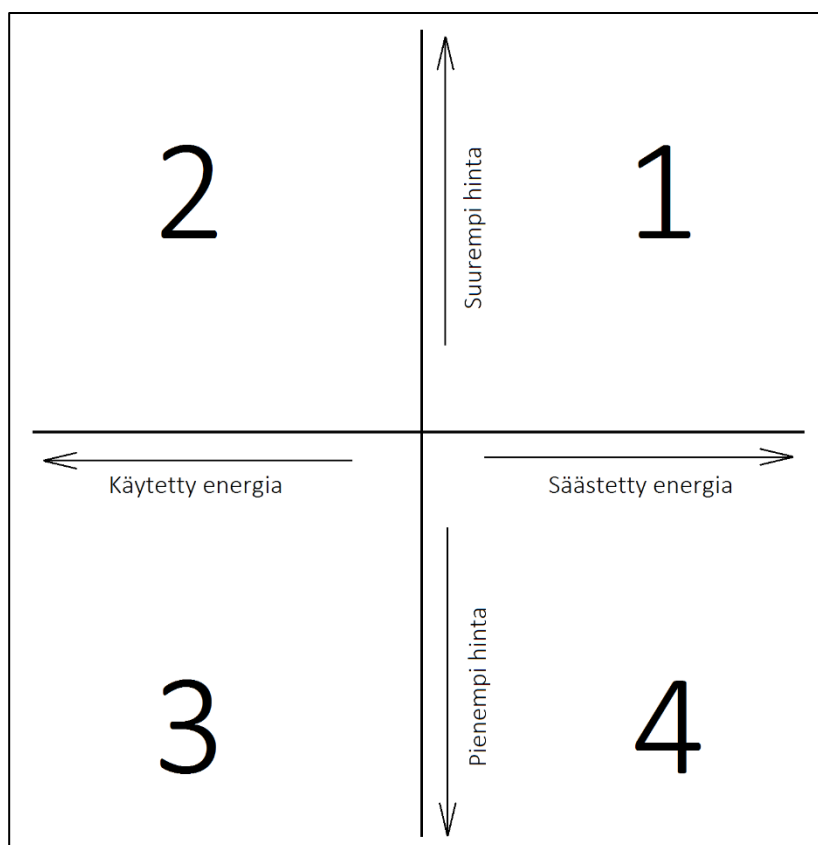
huomioon kaikkia materiaalien valmistusprosesseissa ja rakentamisprosesseissa syntyvistä päästöistä. Toisaalta tutkimuksessa korostetaan, etteivät erot johtuneet ainoastaan lähtötietojen eroista. Eroja syntyi tutkimuksen mukaan myös, koska BIM-liitännäisessä käytetään keskiarvotietoja, jotta se olisi yhteensopiva mahdollisimman laajalle tuotevalikoimalle. LCA-ohjelmistoa käytettäessä tietokantaa voidaan tutkimuksen mukaan käyttää niin, että laskennassa käytetyt tiedot saadaan vastaamaan todellisia tutkittavana olevia prosesseja. Tutkimus toteaa, että kaikki erot laskennassa syntyvät inventaarioanalyysi (LCI) – vaiheessa, koska vaikutusarviointivaiheen (LCIA) metodit ovat samat. Tutkimus korostaa, että vaikka molemmat ovat LCA-laskentaohjelmistoja, niiden suunniteltu käyttötarkoitus ja käyttäjät ovat erilaisia: BIM-LCA – liitännäinen on yksinkertainen työkalu, jonka tarkoitus on tarjota rakennuksen suunnittelijoille helposti ymmärrettävässä muodossa perustietoja rakennuksen ympäristövaikutuksista päätöksenteon tueksi ja jota voi käyttää myös ilman LCA-asiantuntemusta. LCA-laskentaohjelmisto sen sijaan on tutkimuksen mukaan kehitetty yksityiskohtaisten tutkimusten suorittamista varten ja vaatii käyttäjältään syvällistä asiantuntemusta LCI – tietokantojen ja LCIA – metodien käytöstä. (Bueno ja Fabricio, 2018)

Soust-Verdaguer ym. (2017) tutkivat LCA:n ja BIM:n yhdistämisestä tehtyä kirjallisuutta. Tutkimus osoittaa, että kiinnostus elinkaariarvioinnin yhdistämisestä rakennuksen tietomalliin on kasvamassa, mutta kirjallisuutta aiheesta on vielä niukasti. Tutkimus osoittaa myös, että automatisoituun BIM-LCA tiedonvaihtoon suunnittelun alkuvaiheessa on vielä matkaa. Tutkimuksen mukaan BIM-ohjelmistoihin kehitettyjä LCA-työkaluja voidaan käyttää suunnitteluprosessin aikana, erityisesti alustavaan materiaalien valintaan. Tutkimuksessa havaittiin BIM-ohjelmistojen kyvyttömyys mallintaa esimerkiksi käytön aikaisten korjausten ja huoltojen sekä käytön jälkeisen vaiheen vaikutuksia. Tutkimus suosittelee täydellisen LCA:n suorittamista jo suunnittelun alkuvaiheessa, jotta loppukäyttäjä voi valita materiaaliominaisuudet, kuljetusetäisyydet ja rakentamistavat. Tutkimus näyttää, että BIM-LCA integrointi vaikuttaa olevan tarkoituksenmukaista tietomalleissa, jotka sisältävät olennaisimmat materiaalit ja komponentit. Tutkimus osoittaa, että yhdistämällä BIM ja LCA voidaan toteuttaa ainakin ”seulova” LCA – laskenta, joka on käytännöllisin suunnittelun alkuvaiheessa. Tutkimus vahvistaa myös sen, että BIM-LCA integraatiolla voidaan vähentää tiedon keräämiseen tarvittavaa työtä ja sitä voidaan käyttää käytännöllisenä työkaluna rakennusmateriaalien ja energiaskenaarioiden vertailuun, vaikka joitakin

rajoituksiakin tutkimus löysi. Tutkimuksen mukaan loppukäyttäjän näkökulmasta BIM-LCA integraation tulisi helpottaa suunnittelijoita ja insinöörejä saamaan nopeasti ja luotettavasti tietoa rakennuksen ympäristövaikutuksista jo suunnittelun alkuvaiheesta asti. Tutkimus esittää, että heille suurin haaste on ymmärtää rakennuksen koko elinkaaren aikaiset tapahtumat ja siksi loppukäyttäjällä tulisi olla suurempi vaikutusvalta valittaessa rakennuksen käyttötapoja ja rakennusmateriaalien ominaisuuksia, kuten materiaalien kuljetusetäisyydet, materiaalien käyttöikä ja rakentamistavat. Ohjelmistokehittäjillä on tutkimuksen mukaan suurin haaste BIM:n ja LCA:n yhteensopivuuden parantamisessa. Tutkimuksen mukaan ohjelmistokehityksen tulisi jatkossa keskittyä kehittämään ohjelmistoista yhteensopivia avointen tiedostomuotojen, kuten IFC:n kanssa, mieluummin kuin kehittämään BIM-ohjelmistoihin LCA-liittännäisiä. Tutkimuksen mukaan suuri haaste on myös BIM-LCA – prosessin automatisoinnissa: jokaisen materiaalin ja rakenneosan yhdistäminen yksikköprosesseihin rakennuksen kaikissa elinkaaren vaiheissa on huomattu olevan merkittävä haaste. Tiedonsiirron automatisoimiseksi on tutkimuksen mukaan välttämätöntä, että materiaalien ominaisuudet ja rakenneosien määräluettelo voidaan sovittaa BIM-ohjelmistosta LCA-laskentatavan tiedonkäsittelyrakenteeseen. Lopuksi tutkimuksessa todetaan, että BIM-pohjaisen LCA-laskennan täytyy tulevaisuudessa kyetä parempaan kuin laskemaan vain joitakin ympäristövaikutuksia vain joissakin elinkaaren vaiheissa. Tutkimus esittää, että BIM-LCA laskennan täytyisi tarjota loppukäyttäjälle rakennuksen ympäristövaikutusten arviointilaskelma mahdollisimman tarkasti kyseisen rakennuksen yksityiskohtia ja sen konteksteja myöten sen koko elinkaaren ajalta. (Soust-Verdaguer, Llatas ja García-Martínez, 2017).

1.7 Hiilijalanjälki- ja elinkaarikustannuslaskennan tulosten yhdistäminen

Torcellini ym. (2015) esittivät tutkimuksessaan keinon visualisoida samassa kuvaajassa rakennuksen suunnitteluratkaisujen vaikutuksia sekä rakennuksen energiatehokkuuteen, että kustannuksiin (Kuva 6). Kuvaajassa alkuperäisen kohteen tai vertailukohteen tulos asetetaan origoon ja vertailtavien ratkaisuiden tulokset sijoitetaan tulosten mukaan kuvaajaan. Tutkimuksen mukaan energiatehokkuuteen pyrkivät ratkaisut menevät tavanomaisesti usein 1. kvadranttiin: energiankulutusta saadaan pienennettyä, mutta kustannukset kasvavat. Rakennuksen energiatehokkuutta optimoidessa, tulisi tutkimuksen mukaan pyrkiä ratkaisuihin, jotka löytyvät kuvaajan kvadrantista 4: tällöin sekä kustannus, että energiankulutus ovat alkuperäistä suunnitteluratkaisua pienempiä. (Torcellini, Pless ja Leach, 2015)



Kuva 6. Rakennushankkeen suunnitteluratkaisujen vaikutusten visualisointitapa. (Mukaillen Torcellini, Pless ja Leach, 2015)

Rakennuksen ympäristövaikutusten ja taloudellisuuden arviointia on paljolti tehty erillään toisistaan, mutta viimeaikoina niitä on laajalti pyritty yhdistämään (Schmidt ja Crawford, 2018). Schmidt ja Crawford (2018) mukaan aiemmin esitelty LCA:n ja LCC:n yhdistävät tutkimukset voidaan jakaa kahteen ryhmään: ensimmäinen ryhmä laskee ympäristövaikutukset ja elinkaarikustannukset erikseen käyttäen laskentaan olemassa olevia LCA ja LCC – laskentatapoja, tekevät yleensä ensin LCA – laskennan ja sitten LCC – laskennan ja esittelevät näiden tulokset erikseen kytkemällä tulokset yhteen vain heikosti tai ei lainkaan. Toinen ryhmä esittää joko laskentatavan, laskennan kehyksen, laskentamallin tai laskentatyökalun, joilla LCA ja LCC yhdistetään. Vaikka suuri osa yhdistelmän esittelevistä tutkimuksista esittää laskentakehyksen tai – mallin uutena konseptina, Schmidt ja Crawford (2018) mukaan niissä usein käytetään LCA ja LCC – arvioinneista tuttuja termejä, tietokantoja, metodeja ja laskutoimituksia. Schmidt ja Crawford (2018) käyttävät tutkimuksessaan LCA-LCC - laskennan tulosten vertailussa Torcellini ym. (2015) esittelemää konseptia (Kuva 6), mutta esittäen vaaka-akselilla energiankulutuksen sijaan LCA – laskennan tulokset. Heidän mukaansa kuvaaja esittää muuttujien väliset yhteydet ja suunnitteluvaihtoehtojen vaikutukset erittäin tehokkaasti. (Schmidt ja Crawford, 2018).

1.8 Tavoite

Diplomityön tavoitteena oli kehittää tietomallipohjaista asuinkerrostalon elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen arviointia PSOAS sr:n uudisrakennushankkeessa. Osatavoitteena oli soveltuvan laskentamenetelmän ja -sovelluksen valinta, uudisrakennushankkeen laskenta ja tulosten vertailu vastaaviin kohteisiin, sekä suunnitteluprosessin ohjaukseen osallistuminen.

2 TIETOMALLIPOHJAINEN ASUINKERROSTALON ELINKAARIKUSTANNUSTEN JA HIILIJALANJÄLJEN LASKENTA

2.1 Laskentamenetelmän valinta

Laskentamenetelmän valintaa varten määritettiin menetelmältä vaadittavia ominaisuuksia. Hankkeen kannalta oleellista oli, että laskettavat mittarit ovat vertailukelpoisia Suomessa. Kirjallisuudessa rakennuksen elinkaariarviointiin käytettävistä menetelmistä suosituimmat vaikuttaisivat olevan brittiläinen BREEAM ja yhdysvaltalainen LEED. Ne ovat ympäristöluokitusjärjestelmiä, jotka myöntävät rakennukselle sertifikaatin, mikäli se täyttää luokituksen vaatimat edellytykset. Bionova Oy:n (2017) mukaan helmikuussa 2017 Suomessa oli BREEAM – luokituksen saaneita uudisrakennuksia 56 kappaletta ja LEED – luokituksen saaneita 80 kappaletta (Bionova Oy, 2017). Level(s) – mittarin pilotointi on käynnistynyt Suomessa vuoden 2018 alusta ja siihen osallistuu yli 20 rakennushanketta. LEED:n laskentamenetelmä perustuu ISO 14040 ja EN 15804 – standardeihin. Level(s) ja BREEAM – menetelmissä laskenta tehdään EN 15978 – standardin mukaan, kuten suurimmassa osassa rakennusten elinkaariarviointiin kehitetyissä menetelmissä. Menetelmien eroavaisuudet syntyvät LCA:n ensimmäisessä vaiheessa, tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyssä. Osa menetelmistä ottaa huomioon vain rungon ja perustukset, toiset ovat laajempia. Myös huomioon otettavat elinkaaren vaiheet voivat vaihdella. Esimerkiksi LEED ei ota huomioon käytön aikaisen energian ja veden käytön vaikutusta ympäristöön. (Ortiz, Castells ja Sonnemann, 2009; Bionova Oy, 2017). RTS-ympäristöluokitus on Suomen oloihin kehitetty ympäristöluokitusjärjestelmä. Se perustuu CEN TC 350 – standardeihin ja kohteiden auditoinnista vastaa Rakennustieto Oy. Joutsenmerkki on Pohjoismainen ympäristöluokitusjärjestelmä. Joutsenmerkin voi saada vasta valmiille rakennukselle, kun Ympäristömerkintä Suomi Oy on todennut rakennuksen täyttävän vaatimukset. Rakennusten elinkaarimittarit ovat Green Building Council Finlandin julkaisema mittaristo rakennusten ympäristövaikutusten ja tehokkuuden mittaamiseksi. Elinkaarimittarit sisältää EN 15978 – standardin mukaisen elinkaaren hiilijalanjälki – mittarin, sekä EN 15643-4 – standardin mukaisen elinkaarikustannus – mittarin. (Green Building Council Finland, 2013, 2018).

Tutkimuksen tilaajalla oli tarve varautua tulevaan lainsäädäntöön, joten valittu laskentamenetelmä haluttiin olevan vastaava tulevaisuudessa lainsäädännön vaatiman menetelmän kanssa. Lainsäädännön tiedettiin tulevan perustumaan EN 15978 – standardiin. EU:n kehittämän Level(s) – menetelmän tarkoitus on tuottaa Eurooppaan yhtenäinen laskentatapa. BREEAM ja LEED – menetelmät ovat kaupallisia sertifiointijärjestelmiä ja vaikka niillä laskettuja rakennuksia on myös Suomessa, menetelmät ovat kansainvälisiä. RTS-ympäristöluokitus ja Joutsenmerkki ovat myös kaupallisia luokitusjärjestelmiä, joiden saavuttamiseksi täytyy hanke sertifoida kolmannen osapuolen toimesta. Rakennushankkeen ympäristövaikutusten laskentamenetelmäksi valittiin Level(s) – menetelmän elinkaaren hiilijalanjälki – mittari.

Elinkaaren hiilijalanjälki – mittari on EN 15978 – standardin mukainen laskentamenetelmä, jossa ympäristövaikutusluokaksi on valittu ilmaston lämpeneminen, jonka indikaattori on kasvihuonekaasupäästöt, jotka esitetään hiilidioksidiekvivalentteina [kgCO₂e]. Menetelmä on kehitetty Eurooppaan sopivaksi ja sen pilotointi on Suomessa käynnissä, joten vertailtavia kohteita on saatavilla. Oletettiin myös, että tulevaisuudessa tällä menetelmällä laskeminen tulee lisääntymään ja että menetelmällä lasketut tulokset ovat todennäköisesti vertailukelpoisia myös tulevan lainsäädännön vaatiman laskentamenetelmän kanssa. Tällä menetelmällä lasketut tulokset ovat vertailukelpoisia EN 15978 – standardin mukaisesti laskettujen kohteiden kanssa. Elinkaaren hiilijalanjälki – mittari mittaa rakennuksen elinkaaren aikana syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen vaikutusta maapallon ilmaston lämpenemiseen ja ilmastomuutokseen. Mittarin laskennan tavoitteena on vähentää rakentamisen vaikutuksia ilmastoon.

Elinkaarikustannusten laskentamenetelmäksi valittiin EN 16627 – standardin mukainen elinkaarikustannus. Level(s) – menetelmän elinkaarikustannus – mittarin laskentamenetelmä perustuu EN 16627 – standardiin. Hankesuunnitteluvaiheessa investointikustannusten arviointi rakenneosien perusteella on haastavaa, joten hankkeen ongelmakohtien löytämiseksi elinkaarikustannusten lisäksi päätettiin laskea investointikustannukset Haahtelan tavoitehintamenetelmällä. Laskettu investointikustannus asetettiin elinkaarikustannuslaskennassa ”A0 – ennen rakentamista” -vaiheen kustannukseksi, koska sen ajateltiin olevan elinkaarikustannuslaskennan hankintavaiheen tulosta tarkempi. Elinkaarikustannus – mittari mittaa rakennuksen kustannuksia sen elinkaaren kaikissa vaiheissa. Mittarin laskennan tavoitteena on tarjota

rakennuksen käyttäjälle ja omistajalle tietoa investointikustannusten ja käyttökustannusten koostumisesta, sekä niiden keskinäisistä suhteista ja riippuvuuksista.

2.2 Laskentaohjelmiston valinta

Useita LCA – työkaluja on saatavilla rakennuksen elinkaaren ympäristövaikutusten arviointiin. Anand ja Amor (2017) listasivat rakennuksen ympäristövaikutusten laskentaan soveltuvia yleisiä LCA – työkaluja sekä erityisesti rakennusten laskentaan kehitettyjä LCA – työkaluja (Taulukko 3). Heidän mukaansa suosittuja ohjelmistoja ovat GaBi, SimaPro, Athena ja BEES. Käytettävissä olevat vaikutusluokat riippuvat ohjelmiston käyttämästä vaikutusarviointimenetelmästä. Käytetyimmissä ohjelmistoissa on tarjolla useita menetelmiä ja vaikutusluokkia. Osa rakennusten analysointiin luoduista ohjelmistoista sisältää mahdollisuuden tuoda rakennuksen tiedot valmiista tietomallista. (Anand ja Amor, 2017).

Taulukko 3. Rakennusten LCA - laskentaan soveltuvia ohjelmistoja (Mukaillen Anand ja Amor, 2017).

Yleiset LCA – työkalut, jotka soveltuvat myös rakennuksen LCA – laskentaan		Erityisesti rakennusten LCA – laskentaan kehitetyt työkalut	
Nimi	Sisälletyt indikaattorit	Nimi	Sisälletyt indikaattorit
GaBi	K, Y, KHK	Athena	Y, KHK
SimaPro	K, Y, KHK	LEGEP	K, Y
Umberto NXT LCA Software	K, Y, KHK	Envest 2	K, Y
Open LCA	K, Y	ECOSOFT	Y
TEAM™ 5.2	K, Y	BeCost	K, Y
EIO-LCA	K, Y, KHK	BEES	K, Y, KHK
Boustead Model	Y, KHK	EQUER	Y, KHK
		EcoEffect	Y, KHK
		ECO-BAT 4.0	Y
Selite: K - Kustannukset, Y - Ympäristövaikutukset, KHK - Kasvihuonekaasupäästöt			

Bueno ja Fabricio (2016 ja 2018) keräsivät tietoa työkaluista, joissa LCA – laskenta on yhdistetty rakennuksen tietomalliin (Liite 3). Tutkimuksissa todetaan, että vaikka osassa ohjelmistoista on tehty yksinkertaistuksista niiden helppokäyttöisyyden lisäämiseksi, on käyttäjillä vaikeuksia ohjelmiston käytössä ja etenkin LCA – laskennan tulosten tulkinnassa. Bueno ja Fabricio toivovat ohjelmistojen ja metodologian kehityksen lisäksi LCA – laskennan koulutuksen ja tietoisuuden kehittämistä. (Bueno ja Fabricio, 2016, 2018)

GaBi ja SimaPro ovat kirjallisuuden perusteella alalla käytetyimmät ohjelmistot. Niitä käytetään myös Suomessa, mutta ilmeisesti lähinnä pienempien kokonaisuuksien, kuten tuotteiden laskentaan (esimerkiksi EPD:n tekemiseen). Kirjallisuuskatsauksessa löydettiin kaksi Suomessa kehitettyä ympäristövaikutusten laskentaohjelmistoa: ILMARI ja One Click LCA. Ainoastaan kustannuslaskentaan soveltuvia sovelluksia tuli tutkitussa kirjallisuudessa vastaan myös kaksi: Invest for Excel – talousmallinnusohjelma ja Ympäristöministeriön elinkaaren kulut ja päästöt – Excel pohja. ILMARI – arviointipalvelu on VTT:n kehittämä rakennuksen hiilijalanjäljen laskentatyökalu. ILMARI sisältää vain rakennusmateriaaleista koostuvan hiilijalanjäljen laskennan ja se ei tue koko elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten laskentaa. One Click LCA sisältää useiden eri standardien mukaisten ympäristövaikutusten laskentamenetelmät ja se on kehitetty nimenomaan rakennusten ympäristövaikutusten laskentaan. One Click LCA on ollut käytössä useissa Level(s) – pilotointikohteiden laskennassa. Useissa rakennusten LCA – tutkimuksissa, joihin kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin, ei mainittu käytettyä ohjelmistoa. OpenLCA on LCA – laskentaan perehtyvissä tutkimuksissa käytetyin ohjelmisto, koska sen käyttö on ilmaista.

Ohjelmistojen vertailua varten valittiin viisi kategoriaa, joissa ohjelmistojen soveltuvuutta tutkittiin: LCI, LCIA, BIM, LCC ja vertailukelpoisuus. Kaikissa kategorioissa tavoiteltavaa oli soveltuvuus Suomen olosuhteisiin ja PSOAS sr:n UNO – hankkeeseen. LCI:lle merkittävää oli, että ohjelmistolla on käytössä kattava ympäristöselostetietokanta ja laskentamenetelmän haluttiin olevan EN 15978 ja EN 15804 mukainen. Mikäli ohjelmisto sisälsi ympäristöselosteita suomalaisista rakennusmateriaaleista, katsottiin se eduksi. LCIA – menetelmän haluttiin sisältävän EN 15804 + A1:ssä vaaditut CML-IA 2012 – karakterisointikertoimet ja valitun ”ilmaston lämpeneminen” – vaikutusluokan. BIM – kohdassa selvitettiin, voiko ohjelmistoon tuoda

projektin tiedot valmiista tietomallista. Hankkeesta oli olemassa ArchiCAD – malli, josta rakennusmateriaalin tiedot haluttiin tuoda laskentaan. LCC – kohdan tarkoitus oli selvittää, voiko ohjelmistolla tehdä myös elinkaarikustannusten laskentaa. Vertailukelpoisuudella tarkoitetaan tässä ohjelmistolla saatavien tulosten vertailukelpoisuutta Suomessa. Kategoriaan vaikutti ohjelmistolla tehdyn laskennan määrä Suomessa, ohjelmalla saatujen tulosten vertailukelpoisuus muiden ohjelmistojen laskelmiin sekä ohjelmiston käytettävyys tulevaisuudessa lainsäädännön vaatiman laskennan suorittamiseen.

Ohjelmistojen laajan valikoiman vuoksi kattavaa vertailua kaikkien ohjelmistojen kesken ei tehty. Osasta ohjelmistoista oli mahdotonta löytää kattavasti tietoa ostamatta lisenssiä. Useasta ohjelmistosta tiedettiin, että niillä on tehty kokonaisten rakennusten LCA – laskentaa, mutta tutkimuksessa ei saatu selville onko niihin mahdollista tuoda tietoja tietomallista. Jotkin BIM-LCA – ohjelmistot ovat BIM-ohjelmistoon lisättäviä lisäosia. PSOAS sr:lla ei ole käytössään BIM-ohjelmistoja, joten tällaiset ohjelmistot eivät sovellu PSOAS sr:n käyttöön. Ilmainen kokeiluversio saatiin käyttöön muutamasta ohjelmistosta: SimaPro, GaBi, OpenLCA(ohjelmiston täysversio on ilmainen) ja One Click LCA. Ohjelmistojen käytettävyydessä oli selkeitä eroja ja One Click LCA erottui joukosta, koska se on kehitetty nimenomaan rakennusten arviointiin. Kolmen muun ohjelmiston käyttäminen vaatii käyttäjältään selkeästi enemmän LCA – osaamista. ILMARI-arviointipalveluun saatiin myös käyttöoikeus. ILMARI tukee myös BIM-pohjaisen tiedon tuomista, mutta sen käytettävyys oli selvästi One Click LCA:ta haastavampaa.

Ohjelmistojen vertailussa todettiin, että PSOAS sr:n käyttöön soveltuvin työkalu on One Click LCA (jatkossa OCLCA). OCLCA sisältää kaikki ohjelmistolta vaaditut tekniset ominaisuudet, kuten LCI-tietokannat ja LCIA-karakterisointimenetelmät. Nämä ominaisuudet löytyivät tosin lähes kaikista tutkituista ohjelmistoista. OCLCA sisälsi lisäksi mahdollisuuden LCC – laskentaan, jota ei kaikista LCA – ohjelmistoista löytynyt. Useimmista LCA – ohjelmistoista ei joko saatu selville tai ohjelmistosta ei löytynyt mahdollisuutta tuoda laskentatietoja tietomallista. OCLCA:ssa sekin on mahdollista. Koska suuria eroja parhaiten sopivien ohjelmistojen välille oli haastavaa löytää teknisten ominaisuuksien kautta, tärkeimmäksi valintakriteeriksi muodostui ohjelmiston kotimaisuus, käyttäjätuki ja ohjelmiston yhteistyö Level(s) – pilotoinnissa ja lainsäädännön valmistelussa. Suurin osa Suomessa tehdystä Level(s) – pilotoinnin

laskennasta on tehty OCLCA:lla, joka takaa laskennan vertailukelpoisuuden ja siksi on todennäköistä, että tulevaisuudessa lainsäädännössä vaadittava laskenta pystytään tekemään myös tällä ohjelmistolla, jolloin PSOAS sr välttyisi tarpeelta vaihtaa ohjelmisto lainsäädännön astuessa voimaan. OCLCA on suomenkielinen ja tarjoaa ohjeita sekä ohjelmiston käyttöön, että yleisesti LCA – laskentaan suomeksi, joka helpottaa ohjelmiston käyttöä. PSOAS sr hankki käyttöönsä One Click LCA – ohjelmiston, jolla hankkeen elinkaaren hiilijalanjälki ja elinkaarikustannus laskettiin.

One Click LCA – ohjelmisto ei sisällä energiankulutuksen ja investointikustannusten laskentaa. Energiankulutuksen laskentaan valittiin CADS – ohjelmisto, koska siihen oli saatavilla ilmainen opiskelijalisenssi ja sillä saadaan laskettua elinkaarilaskentaan riittävät tiedot. Dynaamiseen laskentaan kykenevän ohjelmiston hankinnasta ei nähty saatavan riittävää lisäarvoa tässä vaiheessa hanketta, koska suuri osa energiankulutukseen vaikuttavista tekijöistä joudutaan joka tapauksessa arvioimaan. Investointikustannukset päätettiin laskea Haahtela-kehitys Oy:n tavoitehintamenetelmällä, joten laskentaan oli perusteltua käyttää Haahtela-kehitys Oy:n Kustannustieto TAKU® – ohjelmistoa.

2.3 Asuinkerrostalohankkeen laskennan ja arvioinnin suorittaminen

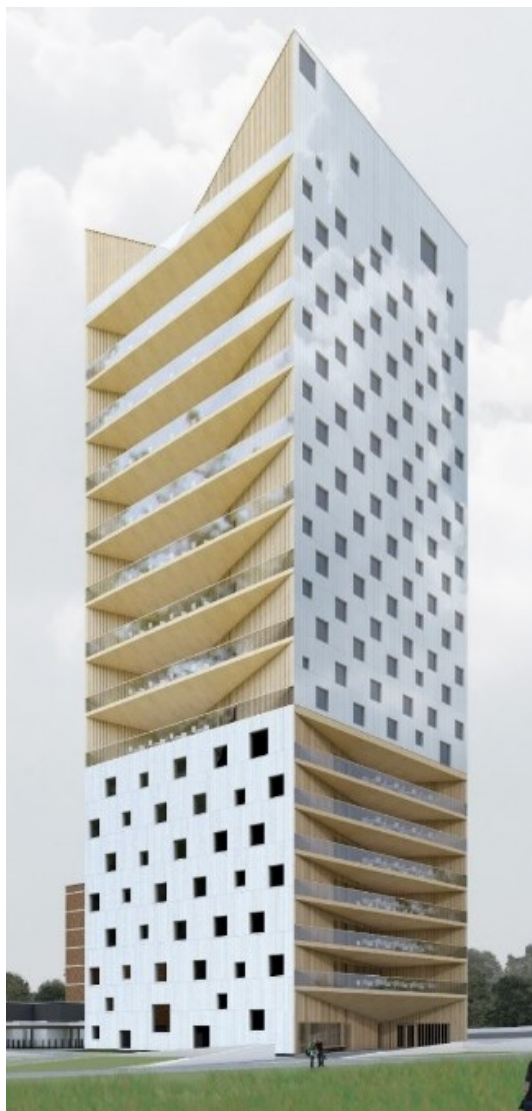
2.3.1 Asuinkerrostalo ja sen laskentatiedot

Kohde on 20 – kerroksinen betonirunkoinen asuinkerrostalo (Kuva 7). Diplomityötä tehdessä rakennuksesta on olemassa arkkitehdin luonnossuunnitelma, jonka mukaan rakennuksen bruttoala on 9700 m^2 , asuinpinta-ala 4400 m^2 ja yhteistilojen ala 1240 m^2 . Asuntoja rakennuksessa on tässä suunnitelmassa 162. Rakennuksen yhteydessä on kylmä parkkihalli, joka on sisällytetty laskentaan. Rakennuksen E-luku on 73, energiatehokkuusluokka on A ja se käyttää lämmönlähteenä kaukolämpöä. Rakennuksen elinkaareksi valittiin 100 vuotta.

Energiankulutuksen suuruus arvioitiin rakennuksen energiatodistuksen perusteella, joka laskettiin Suomen rakentamismääräyskokoelman (2018) laskentaohjeilla. Käyttäjäsähkön kulutusta ei otettu huomioon elinkaarilaskentastandardin ohjeen mukaisesti. Käyttöveden kulutuksen arvioitiin olevan 155 l/hlö/vrk ja rakennuksessa arvioitiin asuvan 180 henkilöä.

Elinkaariarviointiin sisällytettiin rakennusmateriaalien valmistus ja kuljetus rakennuspaikalle, rakentamisvaihe, käyttövaiheen osien vaihdot, peruskorjaukset ja energian kulutus, sekä rakennuksen purkuvaihe. Käyttövaiheen energiankulutukseen sisältyy sähkön, kaukolämmön ja veden kulutus. Elinkaarikustannuslaskennassa huomioitiin lisäksi käyttövaiheen huolto ja ylläpito. Elinkaaren hiilijalanjäljen laskennassa arvioidut elinkaaren vaiheet: A1 - A5, B4 - B7 ja C1 - C4. Elinkaarikustannuslaskennassa arvioidut elinkaaren vaiheet: A0 - A5, B1 - B7 ja C1 - C4.

Arviointiin sisällytettiin rakennuksen materiaalit mahdollisimman kattavasti (Taulukko 4). Materiaalitietojen lähteenä oli pääasiassa tietomalli. Osa materiaalien määristä arvioitiin tietomallin ja pinta-alojen perusteella.



Kuva 7. PSOAS sr UNO. (Antti Karsikas, ALT-arkkitehdit, 2018)

Materiaalien kuljetuksesta rakennuspaikalle syntyviä päästöjä ja kustannuksia arvioitiin OCLCA:n keskiarvotietojen avulla. Materiaalien käyttöikäksi valittiin kaikille tuotteille OCLCA:n tuotteiden oletuskäyttöikä. Materiaalit, joiden suunniteltu käyttöikä poikkeaa rakennuksen suunnitellusta käyttöiästä:

- Ikkunat ja ovet: 40 vuotta
- Kylpyhuoneiden laatoitukset: 30 vuotta
- Sisäpintojen maalit: 20 vuotta
- Lattiamateriaalit, vinyylikorkki: 25 vuotta, muovimatto: 15 vuotta
- Viemärointi- ja putkijärjestelmät: 50 vuotta

2.3.2 Oletukset, rajaukset, yksinkertaistukset ja arviot

Elinkaariarvioinnissa on oletettu energiankulutuksen, energian päästökertoimien sekä energian kustannusten pysyvän nykyisellä tasolla koko rakennuksen elinkaaren ajan. Energian ja veden vuosittaisen kulutuksen suuruudet ovat arvioita. Rakennuksen kiinteät kalusteet, kuten keittiökalusteet ja kodinkoneet poistettiin laskelmista, koska niitä ei laskentastandardin mukaan sisällytetä. Materiaaleista osa jätettiin huomiotta joko tiedon puutteen tai materiaalin pienen merkityksen vuoksi. Talotekniikasta huomioitiin ainoastaan putkisto: talotekniikan laitteita ja järjestelmiä ei huomioitu. Vesikaton kumibitumipinnoitteen vaikutuksia ei huomioitu. Lautaverhousten uudelleen käsittelyä ja vaihtoja ei laskennassa huomioitu. Sprinkleri- ja sähköjärjestelmiä ei ollut laskennassa mukana. Kaikki laskennassa käytetty betoni on oletettu olevan lujuusluokaltaan C30/37 ja sisältävän raudoitusterästä 90 kg jokaista betonikuutiota kohti. Rakennuksen seinien ja pohjien paksuudet ovat arvioita, koska rakennesuunnittelua ei ole vielä tehty. Eristeiden määrät on myös arvioitu. Joitakin tietomallissa olleita rakenteita ei viety elinkaariarvointiin, koska niiden materiaalia ei tunnettu. Näiden osien osuus kokonaistilavuudesta oli niin pieni, että niiden katsottiin olevan merkityksettömiä.

Taulukko 4. Arviointiin sisällytettyjen tietojen lähteet ja tyypit.

Rakenne	Määrätiedon lähde	Materiaalin tyyppi / päästökerroin
Perustukset	Rakennuksen bruttoalan perusteella arvioitu keskiarvotieto	Teräsputkipaalaus 30 m syvyyteen
Ala-, väli- ja yläpohjat	Tietomalli	Teräsbetoni, 90kg raudoitusta betonikuutiota kohti, kipsilevy
Ulko- ja väliseinät	Tietomalli	Teräsbetoni, 90kg raudoitusta betonikuutiota kohti, kipsilevy, märkätilojen väliseinät harkoista
Ulkoeristykset	Tietomalli	Keraaminen laatta, parvekkeiden kohdalla maalattu ulkoeristyslauta.
Eristeet	Arvioitu tietomallin pohjalta	Ulkoseinissä lasivilla. Ala-, väli- ja yläpohjissa EPS.
Ikkunat ja ovet	Arkkitehdin laatima ikkunat ja ovet – luettelo	Ikkunat: Kolminkertainen lasi, alumiinikehys. Puiset sisä- ja ulko-ovet, parvekeovet lasia.
Lasitukset	Tietomalli	Parvekkeiden lasikatot ja lasikaiteet 16 mm paksua tulenkestävää lasia.
Pintamateriaalit	Arvioitu tietomallin pohjalta	Lattiat muovimattoja ja vinyylilikorkkia. Seinät maalattu tai käsittelemätön betoni. Katot betoni tai sisäeristyslauta. Märkätiloissa seinät, lattiat ja katto laatoitettu.

Rakenne	Määrätiedon lähde	Materiaalin tyyppi / päästökerroin
Talotekniikka	Huonealan perusteella arvioitu keskimääräinen viemäröinti- ja putkijärjestelmä.	Putkistojen materiaali polypropeeni ja polymeeri-alumiini-komposiitti.
Hissit	21 kerrosta (sis. kellari), 2 hissiä	Kerros määrän perusteella arvioitu keskiarvotieto.
Portaat	Tietomalli, hätäpoistumistien portaikon koko arvioitu.	Sisäportaat betonia, hätäpoistumistie hitsattu teräsrakenne.
Pysäköintilaitos	Tietomalli	Teräsbetonirunko, ulkoverhouksessa paikoin maalattu lauta
Työmaatoiminnot	Työmaan kooksi arvioitiin 2 000 m ² .	OCLCA:n tietokannasta työmaan koosta riippuva keskiarvotieto: 18,55 kgCO ₂ e/m ²
Verkkosähkö	E-luvusta: 140 822 kWh	OCLCA:n tietokannasta alueellinen keskiarvotieto: 0,22 kgCO ₂ e/kWh
Kaukolämpö	E-luvusta: Lämmitys: 130 880 kWh Lämmin vesi: 310 000 kWh	OCLCA:n tietokannasta alueellinen keskiarvotieto: 0,22 kgCO ₂ e/kWh
Käyttövesi	155 l/hlö/vrk, 180 henkilöä	OCLCA:n tietokannasta alueellinen keskiarvotieto: 0,3 kgCO ₂ e/m ³

2.3.3 Laskentaohjelmiston käyttö

One Click LCA on selainpohjainen sovellus, joten sen käyttö ei vaadi tietokoneelta erityisiä ominaisuuksia. Ohjelmistopäivitykset tulevat myös heti voimaan, koska ohjelmistoa ei tarvitse asentaa tietokoneelle. Laskenta tapahtuu selaimessa, mutta ennen laskennan aloitusta täytyy tiedot energiankulutuksesta ja rakennusmateriaalien määristä tuoda muista ohjelmistoista. Rakennuksesta oli elinkaarilaskennan alkuvaiheessa olemassa arkkitehdin valmistama ArchiCAD – tietomalli. Rakennesuunnittelua ja energiatehokkuustarkastelua ei hankkeelle oltu tässä vaiheessa vielä tehty. ArchiCAD – ohjelmistoon on mahdollista liittää One Click LCA – lisäosa, jonka avulla rakennusmateriaalien tiedot voidaan siirtää One Click LCA – sovellukseen. Alkuperäinen suunnitelma oli siirtää tiedot lisäosan avulla suoraan ArchiCAD:stä, mutta OCLCA - lisäosa ei ollut yhteensopiva käytössä olleen ArchiCAD – version (ArchiCAD 21, opiskelijalisenssi) kanssa. Tiedon siirtämiseen tietomallista laskentaohjelmistoon jäi kaksi vaihtoehtoa: Excel – taulukoiden tai IFC – mallin avulla. ArchiCAD – ohjelmistosta voi tulostaa määrätietoja Excel – tiedostoon, mutta tietojen siirtäminen Excel – taulukoiden avulla osoittautui todella työlääksi ja epäkäytännölliseksi. IFC – mallin käyttämiseksi täytyi hankkia lisenssi myös SimpleBIM – ohjelmistoon. SimpleBIM on ohjelmisto, jolla voi tarkastella IFC - muotoisen tietomallin sisältämiä tietoja ja tietomallia. Ohjelmistoon voi liittää OCLCA – lisäosan, jolla tiedot saa siirrettyä OCLCA – laskentaohjelmistoon. SimpleBIM – lisenssin voi hankkia OCLCA – lisenssin yhteydessä suoraan OCLCA:lta. SimpleBIM osoittautui välttämättömäksi työvälineeksi, koska tietomallin tiedot eivät alkuun olleet riittävän kattavia. Excel – taulukoiden avulla siirtäessä ongelmakohtien ja puuttuvien tietojen löytäminen on työlästä ja haastavaa, koska tietoja voi olla tietomallissa tuhansia rivejä ja tiedot täytyy tarkastaa jokaiselta riviltä yksitellen. SimpleBIM – ohjelmiston avulla puuttuvia ja ongelmallisia tietoja voi tarkastella visuaalisesti tietomallin avulla, joka helpottaa ja nopeuttaa työtä huomattavasti. SimpleBIM myös auttaa käyttäjäänsä osoittamalla tietomallista kohtia, joissa ongelmia tai puuttuvia tietoja saattaa olla.

2.3.4 Rakennuksen tietomallin muokkaus laskentaa varten

Tiedonsiirto tietomallista elinkaarilaskentaohjelmistoon on periaatteessa yksinkertainen prosessi. Ongelmia kuitenkin ilmenee, jos tietomallin tiedot eivät ole täydelliset. Rakenneosien tiedot voidaan syöttää elinkaarilaskentaohjelmistoon rakenneosa

kerrallaan käsin, mutta tehokkaalla tietomallin hyödyntämisellä voidaan säästää huomattavasti aikaa. Huonolla tietomallilla työmäärä voi kuitenkin olla lähes sama kuin käsin syöttäessä. SimpleBIM – ohjelmisto osoittautui tietomallin tarkastuksessa välttämättömäksi työkaluksi. Sen avulla tietomallista voi nopeasti löytää esimerkiksi rakenneosat, joista puuttuu tietoja ja tietomallin tekijää (tässä tapauksessa arkkitehti) voi pyytää lisäämään nämä puuttuvat tiedot tietomalliin. Tietomallin sisältövaatimukset riippuvat sen aiotusta käyttötarkoituksesta. Jos tietomallia halutaan käyttää elinkaarilaskennassa, täytyy jokaisen mallinnetun rakenneosan sisältää mahdollisimman tarkasti ja yhtenäisesti ainakin seuraavat tiedot: luokka, materiaali ja tilavuus (vaihtoehtoisesti pinta-ala ja paksuus). Elinkaarilaskennan tulokset esitetään usein rakennuksen elementtien (perustukset, vaakarakenteet, pystyrakenteet) suhteellisina osuuksina. Luokkatieto määrittelee mihin rakennuselementtiin osa luetaan mukaan. Jotkin elinkaariarviointityökalut laskevat ainoastaan kantavien rakenteiden ja rungon vaikutukset, joten luokkatiedon ollessa väärin, antavat tällaiset laskelmat vääriä tuloksia, koska esimerkiksi rakennuksen rungon osat, joiden luokaksi ei ole määritetty ”runko”, jäävät kokonaan pois laskelmasta. Materiaalit tulisi kuvailla mahdollisimman yksinkertaisesti ja yhtenäisesti. OCLCA yhdistää tiedonsiirtovaiheessa automaattisesti rakenneosat, joiden materiaalitieto on sama. Tämä helpottaa ja nopeuttaa tiedonsiirtoa ja laskennan suorittamista. Ohjelmistossa jokaiselle rakenneosalle täytyy valita sitä parhaiten kuvaava materiaalityyppi. Jos materiaalit on nimetty huonosti tai ei lainkaan, on niille haastavaa löytää sopiva materiaali ympäristötietokannasta. Laskentaan kuluva aika riippuu paljon materiaalitietojen oikeellisuudesta ja hyvydestä. Rakenneosan määrätieto on merkittävin tekijä laskennan tulosten tarkkuudessa. Ympäristövaikutuksen suuruus riippuu materiaalin määrästä, joka taas riippuu rakenneosien tilavuuksista. Elementit(seinät, ala-, ylä-, välipohjat) täytyy mallintaa joko siten, että jokainen rakenneosa (runko, eriste, ilmarako, ulko- ja sisäverhous) sisältää tiedon osan paksuudesta tai siten, että seinäelementti sisältää tiedon siihen sisältyvien osien suhteellisista osuuksista (runko 30 %, eriste 20 %, ...). Jos useita rakenneosia sisältävä elementti ei sisällä tietoa osien määristä, ei ympäristövaikutuksia voida luotettavasti arvioida. Kun tiedot siirretään OCLCA – ohjelmistoon tietomallista, ohjelmisto poistaa laskennasta automaattisesti kaikki rakenneosat, joille ei ole määritetty materiaalia. Tämän vuoksi on tärkeää, että kaikille osille on määritetty ainakin suuntaa antava materiaalitieto, koska muuten osa voi jäädä laskennan ulkopuolelle.

UNO – hankkeessa tietomalli oli tehty alun perin ainoastaan arkkitehdin käyttöön ja ensimmäinen versio sisälsi paljon rakenneosia, joiden materiaali- ja tilavuustiedot olivat puutteellisia. Tietomalli sisälsi alkuun myös hahmotelmia rakennusta ympäröivistä rakennuksista. Tietomallia korjattiin arkkitehdin kanssa elinkaarilaskentaan sopivaksi. Tältä vaiheelta olisi voitu välttyä, mikäli hankkeen alusta asti olisi ollut tiedossa, että tietomallia käytetään elinkaarilaskentaan, jolloin tietomalli olisi voitu jo alusta tehdä elinkaarilaskentaan yhteensopivaksi. Tietomalli sisälsi alkuun asuntojen kiinteät kalusteet, joita ei EN 15978 – standardin mukaisessa laskennassa oteta huomioon. Toisaalta tietomallista puuttui rakennuksen perustukset, hissit ja kaikki LVIS – järjestelmät. Ennen laskentaa tietomallista poistettiin kiinteät kalusteet. Tietomallista puuttuvien osien ympäristövaikutuksia arvioitiin OCLCA – ohjelmiston sisältämällä keskiarvotiedoilla.

2.4 Empiiriset laskennat ja havainnoinnit

2.4.1 Energiankulutuksen laskenta

OCLCA ei sisällä työkaluja energiankulutuksen laskentaan. Ohjelmistoon syötetään ainoastaan valmiiksi laskettu vuotuisen energiankulutuksen arvo. Energiankulutuksen arviointiin käytettiin CADS – ohjelmiston opiskelijalisenssiä. CADS on ohjelmistokokonaisuus, joka kattaa usean eri alan suunnittelutyökaluja. CADS House – ohjelmisto sisältää Energialaskenta 2018 – työkalun, jolla voidaan laskea rakennuksen energiaselvitys, energiatodistus sekä osoittaa rakenteellinen energiatehokkuus. Työkalu suorittaa energialaskennan Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeen ”Energiatehokkuus – Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta” mukaisella kuukausitason laskentamenetelmällä. Laskenta on staattinen ja ei ota huomioon rakennuksen jäähdyttämiseen tarvittavaa energiaa. Tutkittu rakennus kuuluu käyttötarkoitukseluokkaan 2, jolloin jäähdytysenergiantarve tulisi laskea dynaamisella menetelmällä. Laskettua energiatodistusta ei voida käyttää virallisena todistuksena myöskään siksi, että diplomityön tekijällä ei ole laatijapätevyyttä. CADS – ohjelmiston avulla laskettu energiankulutus on kuitenkin riittävän hyvä arvio, jotta sitä voidaan käyttää elinkaarilaskennassa hankkeen tässä vaiheessa. Ohjelmiston käyttö helpottaa laskentaa huomattavasti, koska se täyttää osan tiedoista ja laskentakertoimista valitun käyttötarkoitukseluokan perusteella, mutta energialaskenta vaatii siitä huolimatta

perehtymistä ja oletusten tekemistä. Energiatodistusta laskettaessa rakennushanke oli luonnossuunnitteluvaiheessa, jossa lähes mitään energiankulutuksen laskentaan vaadittavista asioista ei ollut vielä päätetty tai suunniteltu. Laskennassa jouduttiin olettamaan rakennuksen lämmöntuottotapa, lämmitysjärjestelmä, ilmanvaihtojärjestelmä, seinien ja ikkunoiden lämmönläpäisykertoimet (U-arvot) ja lämpimän käyttöveden lämmitys- ja siirtojärjestelmät. Kaikki oletukset ja arviot tehtiin olemassa olevien määräysten mukaisiksi. Järjestelmien tehokkuudet ja U-arvot oletettiin olevan joko vähimmäisvaatimusten mukaiset tai hieman niitä paremmat. Rakennuksen energialuokaksi haluttiin A, joten rakenteet ja järjestelmät valittiin siten, että haluttuun luokkaan päästiin. Tämän vuoksi osa järjestelmistä voi olla tehokkaampia kuin käytännössä voisi olla mahdollista. Laskennassa jouduttiin olettamaan ja arvioimaan niin monta kohtaa, ettei ollut mielekäästä yrittää löytää järjestelmistä heikkouksia tai huonosti arvioituja parametreja. Parametreja muutettiin ja niiden vaikutuksia tuloksiin tutkittiin hieman ja lopulta päädyttiin tilanteeseen, jossa rakennuksen energialuokaksi saatiin A, mutta mitä tahansa laskentaparametria hieman heikentämällä energialuokka tippui B:hen. Tällä pyrittiin varmistamaan, ettei rakennuksen energiatehokkuutta arvioida selkeästi liian optimistiseksi.

2.4.2 Elinkaaren hiilijalanjäljen laskenta

Rakennusmateriaalien tiedot siirrettiin tietomallista OCLCA – ohjelmistoon, johon oli hankittu Level(s) – elinkaaren hiilijalanjälki - laskentalisenssi. Tietojen tuomisen jälkeen ohjelmisto pyytää tekemään kartoituksen. Kartoituksessa jokaiselle tuodulle materiaalitiedolle liitetään OCLCA:n tietokannoista löytyvistä materiaaleista sopivin. Kartoitus on prosessi, jossa määritellään materiaalin valmistamisesta muodostuvan ympäristövaikutuksen suuruus. Tietokannasta tulee valita mahdollisimman tarkasti suunniteltua tuotetta kuvaava materiaali. Kaikille tuotteille ei kuitenkaan ole vielä olemassa ympäristöselostetta, joten joillekin materiaaleille joudutaan valitsemaan tuote, jonka ympäristövaikutukset eivät täysin vastaa käytettävän tuotteen vaikutuksia tai ympäristövaikutukset ovat usean tuoteryhmään kuuluvan tuotteen keskiarvo. Ohjelmisto ehdottaa jokaiselle rakennusosalle arvioidun kuljetusmatkan, kuljetustavan ja käyttöiän, mutta käyttäjä voi vaihtaa ne, mikäli niille on tiedossa todelliset arvot. Ohjelmisto kehottaa kartoitusvaiheessa jättämään huomiotta kaikki rakenteet, joiden tilavuus on alle 1 % rakennusmateriaalien kokonaistilavuudesta niiden pienen merkityksen vuoksi. Jos

tietomallin rakenteet on mallinnettu pieninä osina, voi tämä aiheuttaa merkittävän vaikutuksen tulosten luotettavuuteen, joten tässä vaiheessa täytyy kiinnittää huomiota mitä kaikkea laskennasta poistaa ja miksi. Laskentastandardin ohjeessa mainitaan, ettei laskennasta saa jättää asioita huomioimatta tietojen piilottamiseksi. Ohjelmisto poistaa kartoitusvaiheessa automaattisesti kaikki rakenteet, joille ei tietomallissa ole määritelty materiaalia. Tämäkin voi tietomallinnusvaiheessa tehdyn virheen tai heikon mallintamisen vuoksi aiheuttaa suuren vaikutuksen lopputulokseen. Ohjelmistoon syötetään käsin tiedot vuosittaisesta energian ja veden kulutuksesta. Kuten rakennusmateriaaleille, myös energialle valitaan tietokannasta sopivin skenaario. Energiankäytön päästökertoimiksi valittiin OCLCA:n tietokannasta alueelliset keskiarvotiedot. Rakentamisessa syntyville päästöille voi valita ohjelmiston tietokannasta skenaarion, jonka päästötiedot perustuvat keskimääräiseen tietoon rakennustyömaalla syntyvistä päästöistä. Ennen rakennusmateriaalien tietojen tuomista ohjelmistoon muodostetaan projekti, johon tuotavat tiedot liitetään. Projektin tietoihin syötetään laskentaparametreja, kuten rakennuksen maantieteellinen sijainti, pinta-ala, rungon päämateriaali, sovellettava valuutta ja kustannusindeksit. Laskentaparametrit asetettiin kaikki valitun laskentamenetelmän vaatimiksi tai ohjelmiston oletusarvoiksi. Projektin sisälle on mahdollista muodostaa useampi laskenta, joihin kaikkiin voi tuoda tietomallista eri tiedot. Laskentojen tuloksia voi myöhemmin vertailla ohjelmiston sisällä. Laskentatulokset voi myös tulostaa jokaisesta laskennasta omaan Excel – tiedostoon, jonka jälkeen niiden visualisoinnin voi tehdä itse. Ohjelmisto osoittaa koko laskennan ajan käyttäjälle vielä puuttuvat tiedot ja kaikkien tarvittavien tietojen syöttämisen jälkeen ohjelmisto tulostaa laskennan tulokset. Ohjelmistosta saatavat kuvat ja tulosten analyysit eivät ole kattavia ja tulosten analysointia ja visuaalista esittämistä varten käytettiin Excel – tiedostoja. Laskennan tulokset vietiin Excel – tiedostoon, joka sisältää yksityiskohtaisesti kaikki laskennan tulokset, joten tulosten analysointi voidaan tehdä kattavasti. Useita laskentoja tehtäessä ja laskennan tietoja muutettaessa tämä on kuitenkin työläs ja aikaa vievä menetelmä. Jokaisen laskennan jälkeen täytyy ladata uusi Excel – tiedosto ja tehdä analysointi ja kuvaajat uudelleen. Tiedosto sisältää myös paljon tietoa, jolle ei välttämättä ole käyttöä, joten käyttäjä joutuu suodattamaan itselleen tärkeän tiedon muiden joukosta. Yksinkertaisia vertailuja ja laskennan tärkeimmät havainnot voi tehdä ohjelmiston tarjoamilla kuvaajilla, mutta yksityiskohtaisempaa analysointia varten Excel – tiedoston käyttäminen on lähes välttämätöntä.

2.4.3 Elinkaarikustannusten laskenta

OCLCA:han hankittiin myös elinkaarikustannusten laskentalisenssi. Elinkaarikustannuslaskenta voidaan tehdä ohjelmistossa samassa projektissa ja samoilla laskentaparametreilla kuin elinkaaren hiilijalanjälki. Ohjelmisto poimii automaattisesti elinkaarikustannusten laskentaan rakennusmateriaali- ja energiankulutustiedot, jotka on tuotu hiilijalanjäljen laskentaa varten. Ohjelmistoon täytyy siis tehdä vain yksi projekti, johon rakennuksen tiedot tuodaan ja kaikki laskennat voidaan tehdä samoista lähtötiedoista.

Investointikustannusten laskentaa varten rakennuksesta muodostettiin tilaohjelma, jossa luetellaan rakennuksen tilojen tyypit ja määrät. Tilaohjelman perusteella laskettiin investointikustannus Haahtelan tavoitehintamenetelmällä käyttämällä Kustannustieto TAKU® - ohjelmistoa. Tavoitehintaa laskettiin Oulun Kaupungin Tilakeskuksen kustannussuunnittelijan (Heikki Angeria) avustuksella. Rakennuksen tiedettiin sisältävän tavanomaisesta poikkeavia rakenneratkaisuja, joiden uskottiin johtavan tavanomaista kalliimpiin rakentamiskustannuksiin. Tilaohjelman avulla laskettu tavoitehintaa arvioitiin tilaohjelmassa lueteltujen tilojen rakentamisesta aiheutuvia kustannuksia tavanomaisella rakentamistavalla. Tavoitehintamenetelmällä laskettuihin kustannuksiin täytyi lisätä arvio haastavien rakenteiden aiheuttamista lisäkustannuksista. Lisäkustannusten arviointia varten konsultoitiin rakentamistalouden ammattilaisia (Angeria, 2018; Pitsinki, 2018), jotta saatiin mahdollisimman hyvä arvio todellisista investointikustannuksista.

Lisäkustannukset sisältävä investointikustannus haluttiin viedä OCLCA – ohjelmistoon ja asettaa elinkaarikustannuslaskennassa rakentamisvaiheen kustannukseksi. OCLCA laskee tietomallista tuotujen rakennusosien määrätietojen perusteella rakennusmateriaalien kustannukset, kun jokaiselle rakennusosalle määritetään yksikkökustannus. Investointikustannus sisältää jo arvion materiaalien osuudesta, joten OCLCA:lla laskettu rakennusmateriaalien kustannus vähennettiin investointikustannuksesta. Jäljelle jäänyt kustannus sijoitettiin OCLCA:ssa rakentamisesta syntyviin kustannuksiin. Tällä tavalla saatiin elinkaarikustannuslaskentaan rakentamisvaiheen kokonaiskustannukseksi aiemmin laskettu investointikustannus, eikä materiaalien kustannuksia arvioitu kahteen kertaan. Tuotteiden yksikköhintoja käytettiin OCLCA:n tietokannassa olevia hintatietoja.

Erikseen lasketun investointikustannuksen vuoksi ohjelmistoon syötettävien materiaalien yksikkökustannusten tarkkuudella ei ole vaikutusta lopulliseen tulokseen. Tuotteiden yksikkökustannuksilla oli suuri merkitys myöhemmin tehdyissä materiaalivaihtoehtojen vertailututkimuksessa. Ohjelmiston ehdottamille tuotteiden yksikkökustannuksille ei ole olemassa lähdetietoja. Päästötiedoista voi useille tuotteille ohjelmistosta ladata ympäristöselosteen, jossa päästöjen syntymisen laskenta on esitetty. Kustannuksille ei vastaavia tiedostoja ole saatavilla ja materiaalien yksikkökustannustiedot eivät vaikuta yhtä luotettavilta. Koko rakennuksen elinkaarikustannuslaskennassa sillä ei investointikustannusten laskemisen vuoksi tässä tapauksessa kuitenkaan ollut merkitystä.

Rakennuksen vuosittaisten huolto- ja ylläpitokulujen arvioitiin PSOAS sr:n olemassa olevien kohteiden mukaisesti olevan 5 €/brm²/a. Energian yksikkökustannuksiksi valittiin OCLCA:n tietokannasta alueelliset keskiarvotiedot: verkkosähkölle 0,13 €/kWh, kaukolämmölle 0,07 €/kWh ja vesijohtovedelle 1,2 €/m³. Elinkaarikustannuslaskennassa on laskentaparametreille, kuten alueellinen materiaalikustannusindeksi, työntekijän tuntipalkka, yleinen inflaatioaste, käytetty OCLCA:n alueellisia tietoja. Diskonttauskorkona käytettiin laskentastandardissa määriteltyä arvoa: 3 %. Arvonlisävero on laskennassa huomioitu.

2.4.4 Rakennusten vertailututkimusten suorittaminen

Kaksi vertailututkimusta suoritettiin. Ensimmäisessä vertailtiin koko rakennuksen energiankulutusta, elinkaaren hiilijalanjälkeä ja elinkaarikustannuksia muihin kokonaisten rakennusten vastaaviin laskelmiin. Toisessa vertailututkimuksessa vertailtiin yksittäisten materiaalivaihtoehtojen vaikutuksia rakennuksen energiankulutukseen, elinkaaren hiilijalanjälkeen ja elinkaarikustannuksiin.

Rakennuksen energiankulutuksen vertailua varten energiatodistusrekisteristä (ARA:n ylläpitämä julkinen tietopalvelu) etsittiin vuoden 2016 jälkeen rakennettujen saman suuruusluokan asuinkerrostalojen energiatodistuksia. Vertailuun valittiin kahdeksan asuinrakennusta (Taulukko 5), joiden energiatodistusten tietoja vertaillaan UNO:lle laskettuihin arvoihin. Rakennuksiin viitattaessa käytetään jatkossa rakennuksen sijaintikaupunkia sen nimenä. Rakennusten energiatodistuksista poimittiin tiedot rakennusten vuosittaisesta sähkön ja kaukolämmön kulutuksesta. Energiankulutuksesta

tehtiin kaksi vertailua: vuosittaisen kokonaisenergiankulutuksen vertailu ja vertailu vuosittaisesta energiankulutuksesta rakennuksen lämmitettyä nettoalaa kohti.

Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten vertailua varten etsittiin tutkimuksia ja raportteja vastaavan suuruusluokan rakennuksille tehdyistä elinkaariarvioinneista. Vertailuja varten saatiin käyttöön Bionova Oy:n ARA:lle vuonna 2014 tekemä raportti (Bionova Oy, 2014). Raportti sisältää elinkaaren hiilijalanjälki- ja elinkaarikustannuslaskennan viidelle erilaiselle kohteelle (Taulukko 6). Kaikkien rakennusten huoneistoalaa ei raportissa suoraan kerrottu, joten osalle rakennuksista sille laskettiin arvio raportissa esitettyjen muiden tietojen avulla (punainen pohjaväri). Vertailuun ei löydetty saman suuruusluokan ja rakentamistyyppin asuinkerrostaloa, jotta tuloksia olisi voitu verrata täysin vastaavaan hankkeeseen. Vertailtaessa kuuden keskenään hieman erilaisen kohteen tuloksia, täytyy vertailussa ottaa huomioon kohteiden rakenteellisista eroavaisuuksista johtuvat erot tuloksissa. Bionova Oy:n raportissa kaikkien rakennusten elinkaariarviointi on tehty 50 vuoden elinkaarelle ja raportissa tulokset esitetään asuntoneliöillä jaettuna. Vertailua varten rakennuksen elinkaarikustannukset ja hiilijalanjälki täytyi laskea 50 vuoden elinkaarella ja tuloksia täytyi vertailla kolmen eri pinta-alan suhteen: bruttoala, lämmitettyä nettoala ja asuntoneliöt.

Taulukko 5. Energiankulutuksen vertailukohteiden perustietoja.

Kaupunki	Lämmitysjärjestelmä	Ilmanvaihtojärjestelmä	Lämmitetty nettoala
Espoo 1	Vesikiertoinen lattialämmitys	Koneellinen tulo- / poistoilmanvaihto, lämmön talteenotto (LTO)	8 618 m ²
Espoo 2	Vesikiertoinen patterilämmitys, kylpyhuoneessa vesikiertoinen lattialämmitys	Huoneistokohtainen ilmanvaihto, LTO	8 490 m ²
Espoo 3	Vesikiertoinen patterilämmitys	Koneellinen tulo- / poistoilmanvaihto, LTO	8 256 m ²
Espoo 4	Vesikiertoinen patterilämmitys	Tulo- / poistoilmanvaihto, LTO	8 826 m ²
Helsinki 1	Vesikiertoinen patterilämmitys, kylpyhuoneessa vesikiertoinen lattialämmitys	Keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä	8 280 m ²
Helsinki 2	Vesikiertoinen patterilämmitys	Tulo- / poistoilmanvaihto, tehokas LTO	9 000 m ²
Kerava	Vesikiertoinen patterilämmitys	Keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä	8 036 m ²
Oulu	Vesikiertoinen lattialämmitys	Koneellinen tulo- / poistoilmanvaihto, LTO	8 996 m ²
PSOAS UNO, Oulu	Vesikiertoinen lattialämmitys	Koneellinen tulo- / poistoilmanvaihto, LTO	8 272 m ²

Taulukko 6. Elinkaaren hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten vertailukohteiden perustietoja.

Nimi	Bruttoala	Huoneistoala	Kerrosluku	Päärakenteet
Helsingin kaupungin Asuntotuotanto-toimisto, Eskolantie	8 830 m ²	5 604 m ²	4 rakennusta, 5 – 7 kerrosta	Puurunko, puuverhous, paaluperustus
Joensuun Elli, Leilitie	730 m ²	~ 479 m ²	2	Puurunko, puuverhous (CLT), anturaperustus
Joensuun Elli, Kimpikuja	3 382 m ²	~ 2 029 m ²	6	Betonielementit, julkisivurappaus, anturaperustus
Lahden vanhusten asuntosäätiö, Onnelanpolku	16 355 m ²	~ 10 052 m ²	8	Betonielementit, julkisivurappaus, anturaperustus
Järvenpään mestariasunnot, Torpantie	4 035 m ²	~ 2 226 m ²	6	Betonielementit, betoniverhous, maanvarainen perustus
PSOAS sr, UNO	9 700 m ²	4 401 m ²	20	Betonirunko, laattaverhous, paaluperustus

2.4.5 Rakenneosien vertailututkimusten suorittaminen

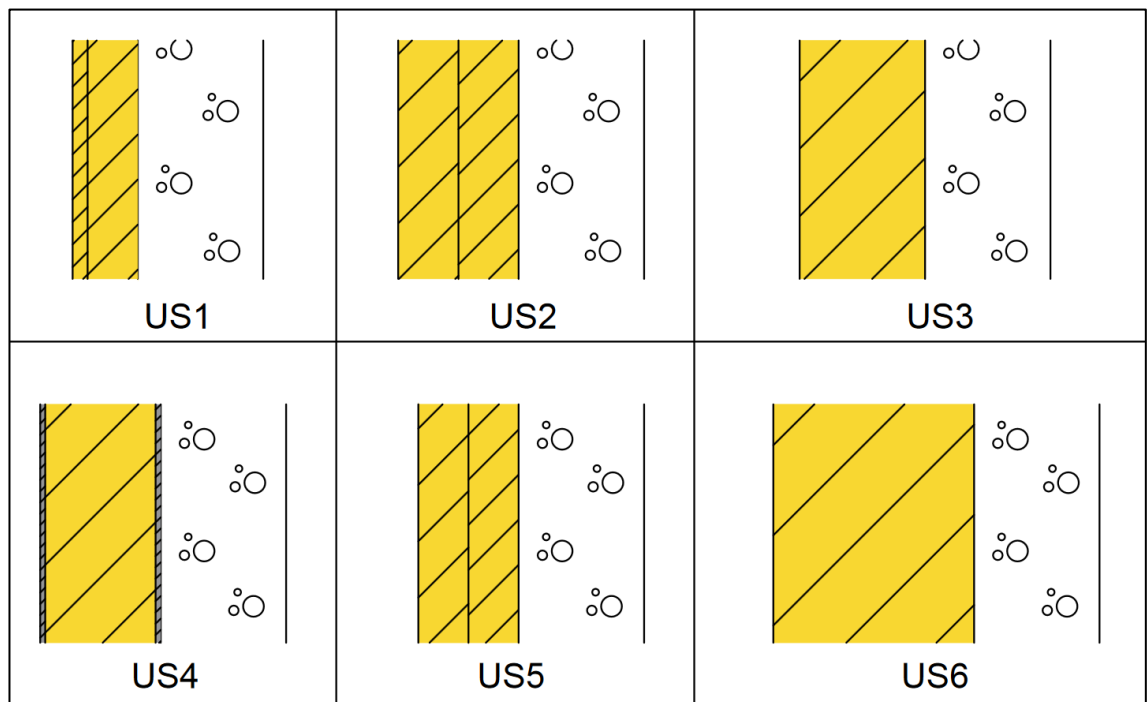
Rakenneosien vertailulaskelmien tulosten esittämisessä on käytetty pohjana Torcellini ym. (2015) tutkimuksessaan esittämää tapaa (Kuva 6). Tutkimuksessa esiteltiin kuvaaja, jossa origoon asetetaan alkuperäinen tai tavanomainen vaihtoehto ja pystyakselilta voidaan lukea vertailtavien vaihtoehtojen kustannusero ja vaaka-akselilta vertailtavien kohteiden käyttämän energian ero. Tässä vertailututkimuksessa vertailtiin vaihtoehtojen elinkaaren hiilijalanjälkeä, joten energian sijaan vaaka-akselilla on elinkaaren hiilijalanjälki. Päinvastoin kuin Torcellini ym. (2015) tutkimuksessaan esitti, tämän vertailututkimuksen tulokset on esitelty niin, että hiilijalanjälki suurenee vaaka-akselilla oikealle mentäessä. Alkuperäistä (origossa sijaitsevaa) vaihtoehtoa edullisempi ja ympäristöystävällisempi ratkaisu löytyy siis kuvaajan vasemmasta alakulmasta (Kuva 6: kvadrantti 3).

Tutkittava rakennus on betonirunkoinen, joten betonia on määrällisesti rakennusmateriaaleista kaikkein eniten. Rakennuksessa on betonia noin 6 000 m³. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutuksia tutkittaessa on betonin todettu olevan materiaaleista suurin päästöjen aiheuttaja (Asif, Muneer ja Kelley, 2007; Chau ym., 2007; Radhi ja Sharples, 2013; Teshnizi ym., 2018). Suurin osa betonin aiheuttamista päästöistä johtuu sen valmistamiseen tarvittavasta sementistä. Betonin käyttämisestä syntyvien päästöjen pienentämiseksi on rakennusalalla kehitelty betoneja, joissa osa tai jopa kaikki sementistä on korvattu vaihtoehtoisilla, ympäristöystävällisemmillä, sideaineilla. Tutkittavan rakennuksen hiilijalanjäljen pienentämiseksi oli perusteltua tutkia millaisia mahdollisuuksia kierrätysbetonin käyttäminen tarjoaa. Koko rakennuksen hiilijalanjälkilaskelmassa oletettiin, että kaikki betoni on lujuusluokaltaan C30/37. Suuremman lujuusluokan betonin valmistamiseen vaaditaan yleisesti suurempi määrä sementtiä. Vertailun vuoksi tutkittiin myös vaihtoehtoa, jossa rakennuksen kantavat rakenteet valmistettaisiin C50/55 – lujuusluokan betonista ja kevyemmät rakenteet C12/15 – lujuusluokan betonista. Vertailuun valittiin kolme C30/37 – lujuusluokan betonia, joissa käytetty vaihtoehtoisten sideaineiden määrä vaihtelee 10 – 40 % välillä. Lisäksi valittiin kaksi vaihtoehtoa, joissa 4 000 m³ betonista on C50/55 – lujuusluokan betonia ja 2 000 m³ on C12/15 – lujuusluokan betonia. Käyttöikä kaikille vaihtoehdoille valittiin samaksi. Kaikkien betonityyppien yksikköhinnat valittiin OCLCA:n tietokannan oletushinnoiksi. Huomattavasti todenmukaisemman tutkimustuloksen olisi saanut, jos

käytettävissä olisi ollut betonivalmistajien hintatietoja. OCLCA:n tietokannassa betonivaihtoehtojen yksikköhinnat olivat lujuusluokkien sisällä keskenään samat, koska tietokanta sisältää kunkin betonityypin keskimääräisen hinnan. Vaikka betonin valmistamisessa käytetään eri määrä vaihtoehtoisia sideaineita, niiden hinta olisi sama, mikä tuskin todellisuudessa pitää paikkaansa. Tämän vertailututkimuksen tulosten perusteella ei siis voida tehdä johtopäätöksiä betonin kierrätysasteen vaikutuksesta sen kustannuksiin. Käytetyt betonityypit eivät ole valmistajien tuotenimikkeitä, joten niiden ympäristövaikutuksetkaan eivät ole tarkkoja tuotekohtaisten ympäristöselosteiden tuloksia, vaan luokkansa tuotteiden keskiarvoja. Koska vertailtavat tyypit eivät ole valmistajien tuotteita, on niiden kuljetusmatka rakennuspaikalle oletettu kaikille samaksi. Tämä vertailututkimus ei ole tarkka betonituotteiden vertailu, vaan suuntaa antava betonityyppien vertailu. Suunnittelun edetessä tarkempien tulosten saavuttamiseksi tulisi valita tiettyjen valmistajien tietyt betonituotteet ja tehdä vastaava vertailu uudestaan. Tällaisessa vertailussa voi löytyä eroja myös ominaisuuksiltaan täysin vastaavien tuotteiden välillä, kun tässä tutkimuksessa on etsitty eroja ainoastaan betonityyppien välillä. Vertailuun valitut viisi betonityyppiä on lueteltu alla. Origoon asetettiin C30/37, 10 % - betoni, koska sitä käytettiin koko rakennuksen elinkaariarvioinnissa.

- C30/37 – lujuusluokan betoni, jossa 10 % sementistä on korvattu vaihtoehtoisilla sideaineilla (Origossa, tavanomainen ratkaisu),
- C30/37 – lujuusluokan betoni, jossa 40 % sementistä on korvattu vaihtoehtoisilla sideaineilla,
- C30/37 – lujuusluokan betoni, jossa 10 - 25 % sementistä on korvattu vaihtoehtoisilla sideaineilla,
- C50/55 – lujuusluokan betoni, jossa 10 % sementistä on korvattu vaihtoehtoisilla sideaineilla ja C12/15 – lujuusluokan betoni, jossa 40 % sementistä on korvattu vaihtoehtoisilla sideaineilla,
- C50/55 – lujuusluokan betoni, jossa 10 % sementistä on korvattu vaihtoehtoisilla sideaineilla ja C12/15 – lujuusluokan betoni, jossa 10 % sementistä on korvattu vaihtoehtoisilla sideaineilla.

Tietomallin sisältämät tiedot eristeiden määristä ja materiaaleista olivat arkkitehdin arvioita. Eristetyypin ja määrän vaikutusten havainnollistamiseksi tehtiin seinärakenteiden vertailututkimus. Seinärakennevertailuun valittiin kuusi erilaista vaipparakennetta (Kuva 8). Rakennuksen ulkoseinien pinta-alan suuruus arvioitiin tietomallista. Seinärakenteiden rakenneosien määrä laskettiin kertomalla ulkoseinän pinta-ala ($4\,695\text{ m}^2$) rakenteen paksuudella. Rakenteet erosivat toisistaan eristemateriaalin, eristeen määrän ja näistä johtuen U-arvojen osalta. Kaikissa vaihtoehtoissa oletettiin olevan yhtä paljon betonia, joten tutkittiin ainoastaan eristeen vaikutuksia. Kaikkien eristemateriaalien käyttöiän oletettiin olevan rakennuksen elinkaaren pituinen. Kaikkien vaihtoehtojen kuljetusmatka työmaalle oletettiin olevan sama. Materiaalien yksikköhintojen määrittämistä varten etsittiin markkinoilta vastaavia tuotteita ja yksikköhinnoiksi valittiin mahdollisimman hyvä arvio tuotteiden hintojen keskiarvosta. Vertailussa otettiin huomioon seinärakenteen U-arvon vaikutus koko rakennuksen energiankulutukseen. Rakennuksen kokonaisenergiankulutus laskettiin jokaiselle seinärakenteelle sen U-arvon perusteella. Energiankulutuksesta johtuvien hiilijalanjäljen ja kustannusten vaikutus lisättiin materiaaleista johtuviin hiilijalanjälkeen ja kustannuksiin.



Kuva 8. Seinärakennevertailun vaihtoehtojen poikkileikkaukset.

Vertailuun valittujen seinärakenteiden nimi, eristetyyppi ja määrä, sekä U-arvot on lueteltu alla. Origoon asetettiin US3, koska koko rakennuksen elinkaariarvioinnissa ulkoseinien U-arvona käytettiin 0,12 ja seinien eristemateriaalina oli EPS.

- US1: Tuulensuojaeriste: 30 mm ja lasivilla: 100 mm, U-arvo: 0,16
- US2: 2 kpl polyuretaanilevy, yhteensä: 240 mm, U-arvo: 0,09
- US3: EPS eristelevy: 250 mm, U-arvo: 0,12
- US4: Sandwich-elementti (metallipinnat ja kivivillaeriste): 240 mm, U-arvo: 0,16
- US5: 2 kpl lasivilla, yhteensä: 200 mm, U-arvo: 0,17
- US6: Lasivilla: 400 mm, U-arvo: 0,095

Asuntoihin valittavan lattian materiaalista käytiin diplomityön tekemisen aikana keskustelua ja diplomityön tilaaja pyysi vertailututkimuksen lattiamateriaalien kustannuksista ja hiilijalanjäljestä päätöksenteon tueksi. Lattiamateriaalien vertailuun valittiin kuusi erilaista lattiamateriaalia: kolme ominaisuuksiltaan erilaista laminaattia, muovimatto, kokolattiamatto, sekä arkkitehdin asuntoihin suunnittelema vinyylilikorkki (Taulukko 7). Muovimattoa pidetään helppona ja edullisena vaihtoehtona, joten se valittiin mukaan tyypilliseksi ratkaisuksi. Laminaattityyppejä on markkinoilla lukusia, joten vertailuun valittiin kolme erilaista tutkimuksen kattavuuden lisäämiseksi. Kokolattiamaton oletettiin olevan huonoin vaihtoehto ja se valittiin vertailun vuoksi mukaan. Arkkitehdin suunnitelmissa asuntoihin on valittu vinyylilikorkkilattiat, joten se haluttiin myös vertailuun mukaan. Asuntojen lattiapinta-alan määrä arvioitiin tietomallista. Lattiamateriaalien määrä laskettiin kertomalla lattiapinta-ala ($3\,834\text{ m}^2$) materiaalin paksuudella. Lattiamateriaaleille valittiin OCLCA:n tietokannasta niitä parhaiten kuvaava ympäristöseloste. Ympäristöselosteen tietojen perusteella tuotteille etsittiin markkinoilta mahdollisimman tarkka arvio yksikköhinnalle. Käyttöiät arvioitiin yhdessä ympäristöselosteen ja markkinoilta valitun tuotteen tietojen perusteella. Origoon asetettiin muovimatto, koska sen oletettiin olevan halvin ratkaisu ja muiden vaihtoehtojen tuloksia haluttiin verrata siihen.

Taulukko 7. Lattiamateriaalivertailun vaihtoehtojen tiedot.

Nimi	Tyyppi	Käyttöikä	Hinta
Kokolattiamatto	Nukkamatto, paksuus noin 7 mm	10 v	15 €/m ²
Laminaatti 1	HPL – korkeapainelaminaatti, paksuus: 11 mm, käyttöluokka: KL33	20 v	30 €/m ²
Laminaatti 2	Laminaatti, paksuus: 6 mm, KL31	20 v	7 €/m ²
Laminaatti 3	Suoralaminaatti, paksuus: 8 mm, KL32	25 v	17 €/m ²
Muovimatto	Vinyylimatto, paksuus: 2,4 mm	15 v	17 €/m ²
Vinyylikorkki	Vinyylipintainen korkki, paksuus: 10,5 mm, KL33	25 v	55 €/m ²

2.4.6 Asuinkerrostalohankkeen suunnitteluprosessin ohjaukseen osallistuminen

Suunnitteluprosessin ohjaukseen osallistuminen jakautui kolmeen osatavoitteeseen. Yksi tavoite oli tutkia rakentamisen kustannuksia, ympäristövaikutuksia ja eri suunnitteluvaihtoehtojen pinta-aloja, jotta vaihtoehdolle saatiin neliöhintoja ja hiilijalanjälkilaskelmia päätöksenteon tueksi. Toinen tavoite oli esitellä diplomityötäni rakennusprosessiin osallistuville tahoille, jotta elinkaariajattelu olisi suunnittelussa esillä ja se ohjaisi valitsemaan ympäristöystävällisempiä ratkaisuja. Kolmas tavoite oli suunnitella toimintakonsepti elinkaarilaskennan sisällyttämisestä rakentamisprosessiin.

PSOAS sr:n henkilöstöllä oli diplomityön alkaessa mielikuva, että rakennuksen rakentaminen on tavallista kalliimpaa, mutta he halusivat konkreettisia lukuja ja syitä rakentamisen suuremmista kustannuksista. Tämän selvittämiseksi esittelin suunnitelmia rakennusliikkeen ja suunnittelutoimiston edustajille, sekä rakentamistalouden asiantuntijoille. Kommenteista keräsin koosteen syistä, jotka kasvattavat suunnittelukustannuksia ja rakentamisen kustannuksia. Valmistelin yhdessä rakentamistalouden ammattilaisten kanssa investointikustannusarvion. Esittelin PSOAS sr:n avainhenkilöille tekemäni investointikustannusarvion ja hankkeen haastavuutta lisäävät asiat, jotta heillä on edellytykset pienentää kustannuksia rakennushankkeen suunnittelun edetessä. Esittelemällä rakentamisen kustannusten suuruuden ja sitä kasvattavia tekijöitä pyrin ohjaamaan suunnittelua kustannustehokkaampaan suuntaan. Ensimmäisessä suunnitelmassa 8 ylintä kerrosta olivat tavallista korkeampia ja näiden kerrosten huoneistoissa oli parvet. Jokaisessa kerroksessa oli yhteiskeittiö ja kaikille

asukkaille yhteistä oleskelutilaa, sekä noin 50 m² suuruinen parveke. Lisäksi ensimmäinen ja ylin kerros olivat kokonaan yhteiskäyttötiloja. Yhteistiloja oli hankkeen yhteistyökumppani ARA:n mukaan liian paljon suhteessa asuntoneliöihin, joten vuokrattavan alan lisäämiseksi tehtiin uusi suunnitelma, jossa 8 korkeaa kerrosta muutettiin normaaliin korkeuteen ja kerrosmäärä kasvoi neljällä, rakennuksen korkeuden pysyessä samana. Tein vertailulaskelmia näiden kahden suunnitelman pinta-alojen suhteista, sekä energiankulutusten ja kustannusten suuruudesta. Suunnittelun ohjauksen kannalta tärkeimmät vertailulaskelmat olivat ero yhteistilojen ja asuntojen pinta-alojen suhteessa, ero energiankulutuksen suuruudessa sekä ero rakentamisen neliö hinnassa. Suunnittelun edetessä tein pinta-aloista vertailulaskelmia usealle eri vaihtoehdolle. Osallistuin suunnittelun ohjaukseen tuottamalla PSOAS sr:lle laskelmia, joiden avulla he pystyivät perustellusti valitsemaan paremman suunnitteluratkaisun ja perustelemaan valintansa myös hankkeeseen osallistuville tahoille. Laskin myös hiilijalanjäljen koko rakennukselle sekä muutamille materiaalivaihtoehdoille. Näiden tulosten avulla pyrin tarjoamaan mahdollisuuksia pienentää rakennuksen hiilijalanjälkeä suunnitteluratkaisuilla.

Esittelin diplomityöni taustaa, tuloksia ja päätelmiä PSOAS sr:n johtoryhmälle ja rakennustoimikunnalle. Kävin myös rakennesuunnittelun aloituskokouksessa esittelemässä tutkimustani rakennesuunnittelutoimiston hankkeeseen osallistuvalla henkilöstöllä. Näiden kokousten suurin tavoite oli saada luotua kaikille hankkeeseen osallistuville ajatus elinkaariajattelun tärkeydestä, jotta ympäristövaikutusten ja elinkaarikustannusten huomioiminen kulkee mukana koko hankkeen ajan. Pyrin ohjaamaan hankkeeseen osallistuvien ajattelua ja mielikuvia siten, että kaikissa hankkeeseen liittyvissä päätöksissä otettaisiin huomioon vaikutukset ympäristöön ja elinkaarikustannuksiin. Esittelemällä elinkaarilaskennan tuloksia pyrin luomaan käsityksen hankkeen mahdollisista ongelmakohtista hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten kannalta, jotta niiden kehittämiseen voidaan kiinnittää suunnittelussa huomiota mahdollisimman varhaisesta vaiheesta lähtien.

Diplomityön aikana ja rakennusprosessin edetessä tutkin keinoja sisällyttää hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten laskenta osaksi rakennusprosessia. Tässä hankkeessa laskenta oli minun tehtäväni ja kun olin opetellut laskennan, pystyin tekemään uusia laskelmia aina tarvittaessa. Tutkin ajankäyttöä ja laskelmien

hyödyllisyyttä hankkeen eri vaiheissa, jotta pystyin tutkimaan milloin laskentaa on hyödyllistä tehdä ja missä laajuudessa. Diplomityön osana tein myös laskelmia eri tuotteiden ja materiaalien vaikutuksista hiilijalanjälkeen ja elinkaarikustannuksiin. Työn aikana selvitin kuinka näitä laskelmia voidaan hyödyntää rakentamisprosessissa ja miten vertailulaskelmien tulokset saadaan parhaiten hyödynnettyä hankkeen hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten pienentämiseksi. Osallistuin suunnittelun ohjaukseen muodostamalla suosituksen toimintamallista, jolla elinkaarilaskenta sisällytetään rakennusprosessiin ja laskennan tuloksia voidaan hyödyntää prosessin aikana päätöksenteon tukena.

3 TULOKSET

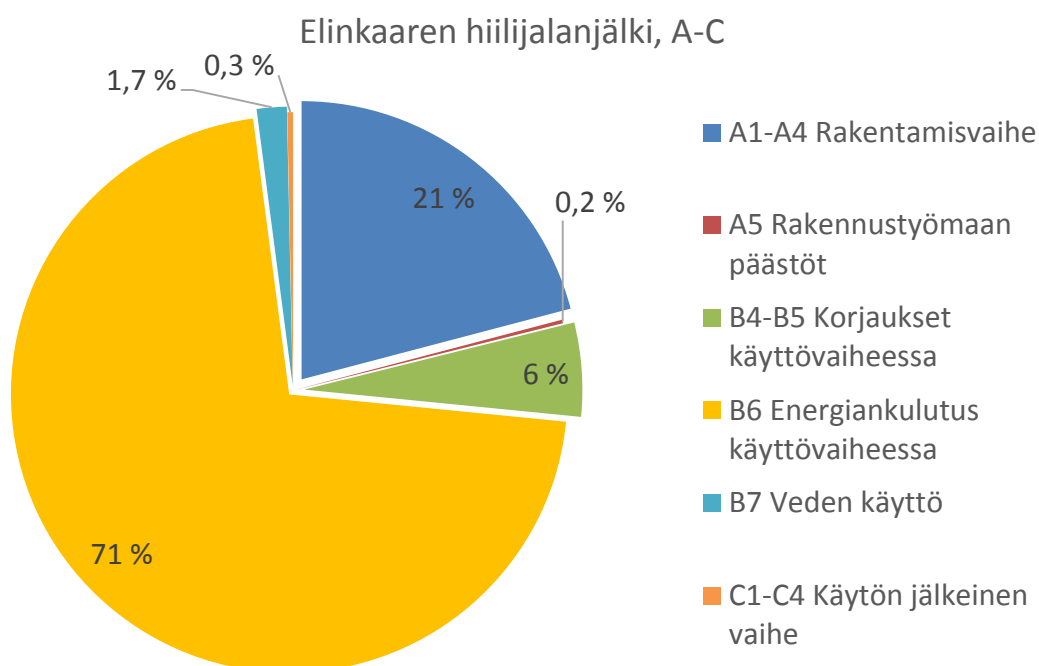
3.1 Rakennuksen energiankulutus

Rakennukselle lasketun energiatodistuksen (Liite 1) tuloksista selviää, että:

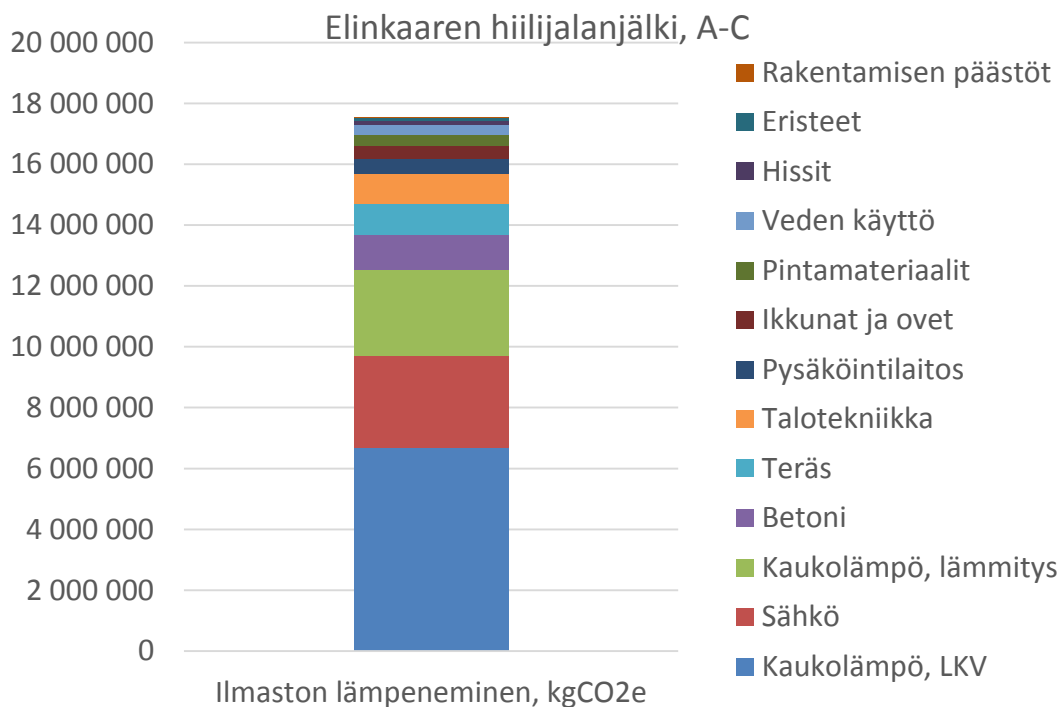
- Rakennuksen energiatehokkuusluokka on A (E-luku ≤ 75).
- Rakennuksen E-luku on $73 \text{ kWh}_E/\text{m}^2\text{vuosi}$ (minimivaatimus on 90).
- Rakennus täyttää energiaselvityksen vaatimukset.
- Rakennus täyttää rakenteellisen energiatehokkuuden vaatimukset.

- Rakennuksen kokonaisenergiankulutus on $516\,486 \text{ kWh} / \text{a}$.
 - o Ei sisällä käyttäjä sähköä.
- Kaukolämmön osuus energiankulutuksesta on $440\,880 \text{ kWh} / \text{a}$.
 - o Lämpimän käyttöveden lämmitys: $289\,520 \text{ kWh/a}$.
 - o Tilojen lämmitys: $151\,360 \text{ kWh/a}$.
- Kiinteistösähkön osuus energiankulutuksesta on $75\,606 \text{ kWh} / \text{a}$.

Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki on 17 537 632 kgCO₂e (Kuva 9, Kuva 10).

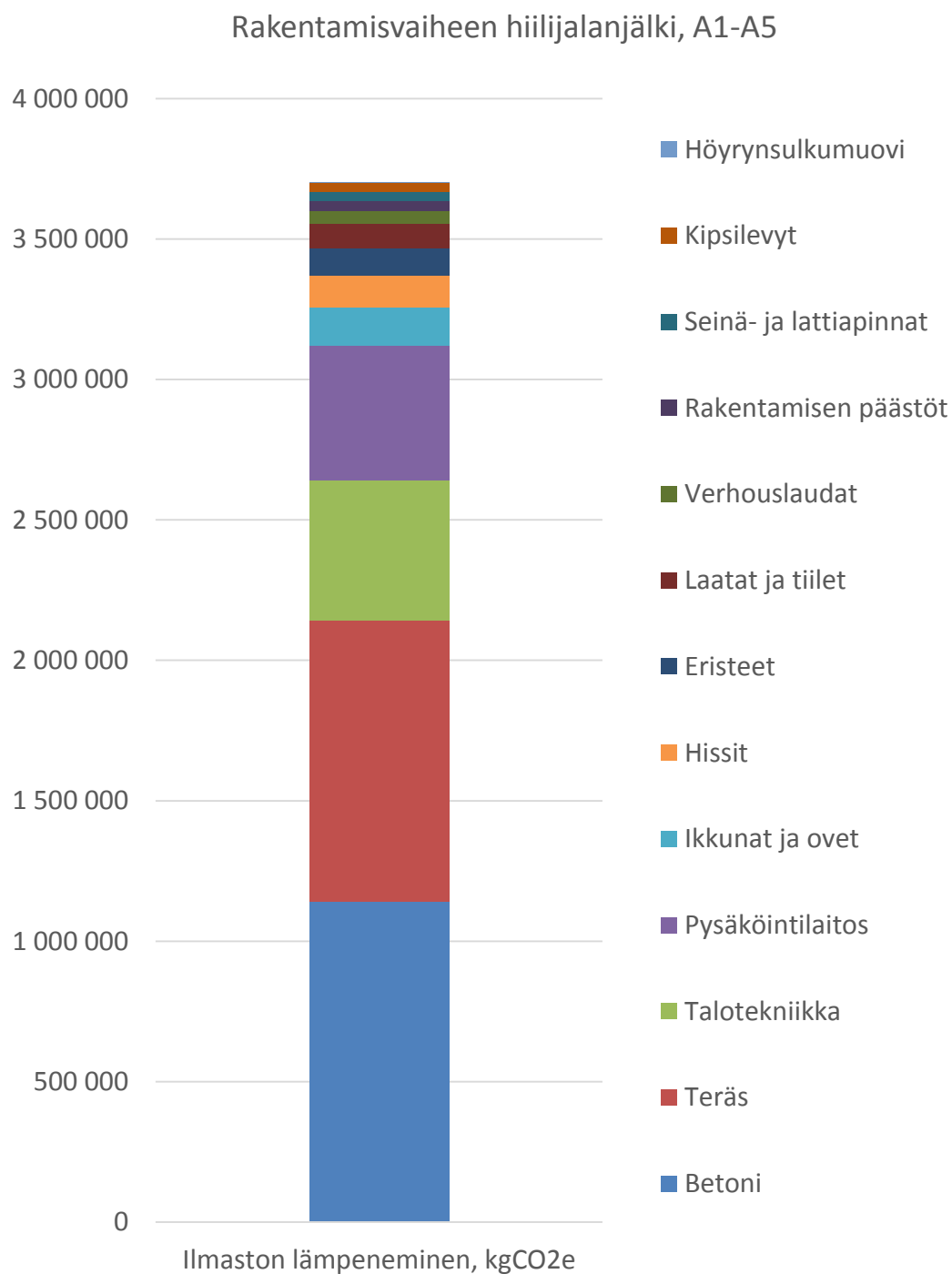


Kuva 9. Elinkaaren hiilijalanjäljen jakautuminen elinkaaren vaiheisiin.

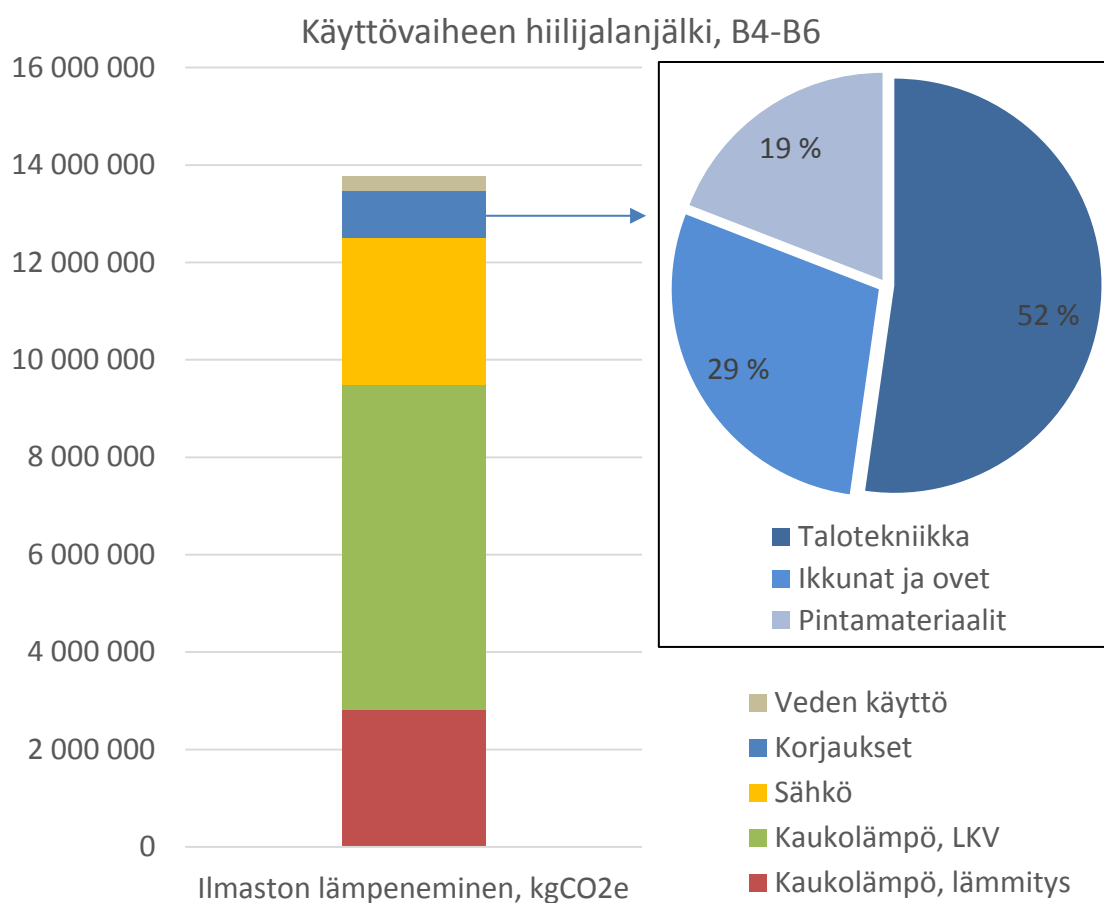


Kuva 10. Elinkaaren hiilijalanjäljen muodostuminen.

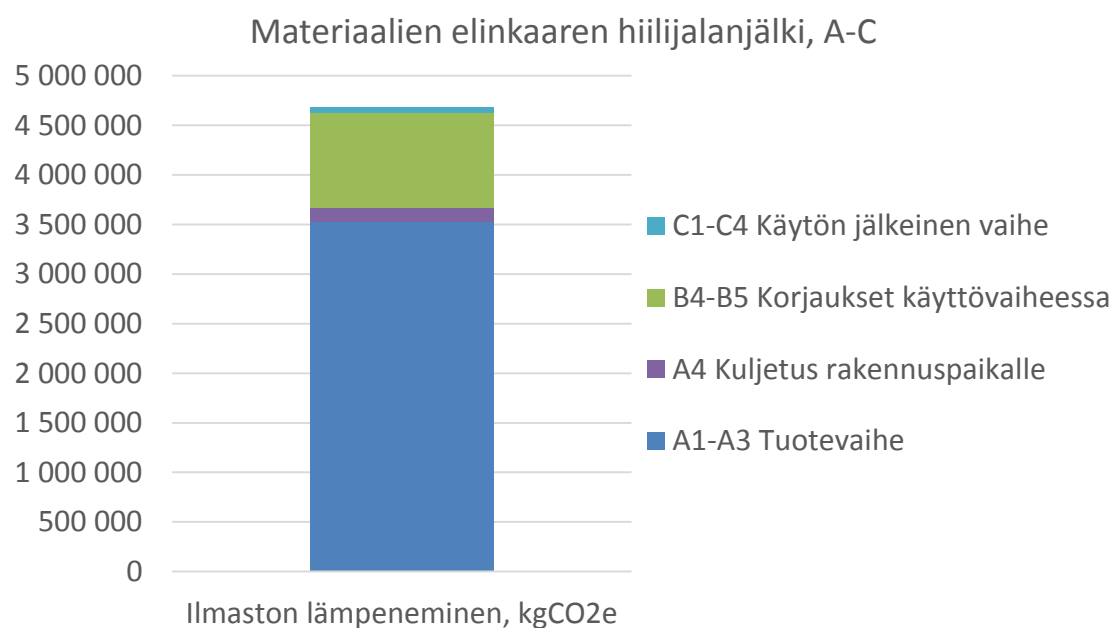
Rakentamisvaiheessa syntyvä hiilijalanjälki muodostuu materiaalien valmistuksen ja rakentamisprosessin hiilijalanjäljistä (Kuva 11). Käyttövaiheen hiilijalanjälki muodostuu energiankulutuksen ja korjausten hiilijalanjäljistä (Kuva 12). Rakennusmateriaalit muodostavat hiilijalanjäljen kaikissa elinkaaren vaiheissa (Kuva 13).



Kuva 11. Rakentamisvaiheen hiilijalanjäljen muodostuminen.



Kuva 12. Käyttövaiheen hiilijalanjäljen muodostuminen.



Kuva 13. Rakennusmateriaalien elinkaaren hiilijalanjäljen jakautuminen elinkaaren vaiheisiin.

3.3 Elinkaarikustannukset

3.3.1 Investointikustannus

Investointikustannukset laskettiin Haahtelan tavoitehintamenettelyllä. Tähän on poimittu tärkeimmät kohdat, tulosten erittely löytyy liitteistä. (Liite 2). Summat sisältävät arvonlisäveron 24 %. Tavoitehintaa: 28 775 000 €, asunnot: 14 907 000 €, yhteiskäyttötilat: 4 099 000 €.

Rakentamistalouden ammattilaisten (Angeria, 2018; Pitsinki, 2018) avulla arvioitiin rakennuksen haasteellisuuden vaikutuksia kustannuksiin (Taulukko 9).

Taulukko 9. Rakennuksen haasteellisuuden vaikutus investointikustannuksiin.

Talo 80 – nimike, johon lisäkustannus kohdistuu	Lisäkustannuksen syy	Arvio lisäkustannuksesta
Runko- ja vesikattorakenteet	Erikoisesta runkoratkaisusta johtuva lisä	15 %
Suunnittelu ja tutkimukset	Rakennuksen suunnittelusta johtuva lisä	30 %
Työmaan käyttö- ja yhteiskustannukset	Korkeammista nostoista johtuva lisä	10 %
Täydentävät rakenteet	Ikkunoiden hankinnan ja asennuksen lisähinta, korkea rakennus, paljon suuria ikkunoita	10 %
LVI - työt	LVI:n osuus tavoitehintamenettelyllä usein alakanttiin	10 %

Rakennuksen investointikustannus rakennuksen haasteellisuus ja rakennusliikkeen kate huomioituna:

- Investointikustannus, rakennuksen haasteellisuus huomioitu, ALV 24 %, rakennusliikkeen kate 10 %: 30 739 000 €,
- Investointikustannus, rakennuksen haasteellisuus huomioitu, ALV 24 %, rakennusliikkeen kate 13 %: 31 846 000 €.

Rakennukselle laskettu arvio investointikustannukselle on 30 739 000 € - 31 846 000 €.

Investointikustannuksen arviot laskettiin neliöhintoina rakennuksen bruttoalaa ja asuntoneliötä kohti (Taulukko 10).

Taulukko 10. Investointikustannusarviot neliöhintoina.

Kustannusarvio	Kustannus bruttoalaa kohti (9 702 m ²)	Kustannus asuntoneliötä kohti (4 401 m ²)
28 775 000 €	2 966 € / m ²	6 538 € / m ²
30 739 000 €	3 168 € / m ²	6 985 € / m ²
31 846 000 €	3 282 € / m ²	7 236 € / m ²

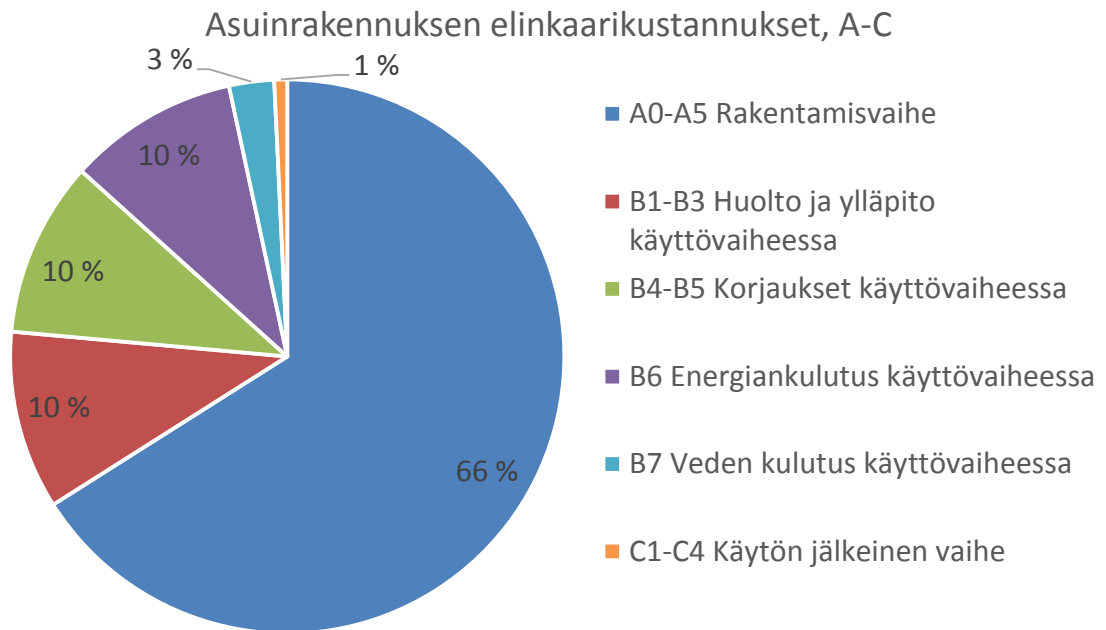
3.3.2 Elinkaarikustannus

Level(s) – menetelmän mukaan elinkaarikustannukset täytyy laskea referenssikäyttöiälle (50 vuotta) (Taulukko 11).

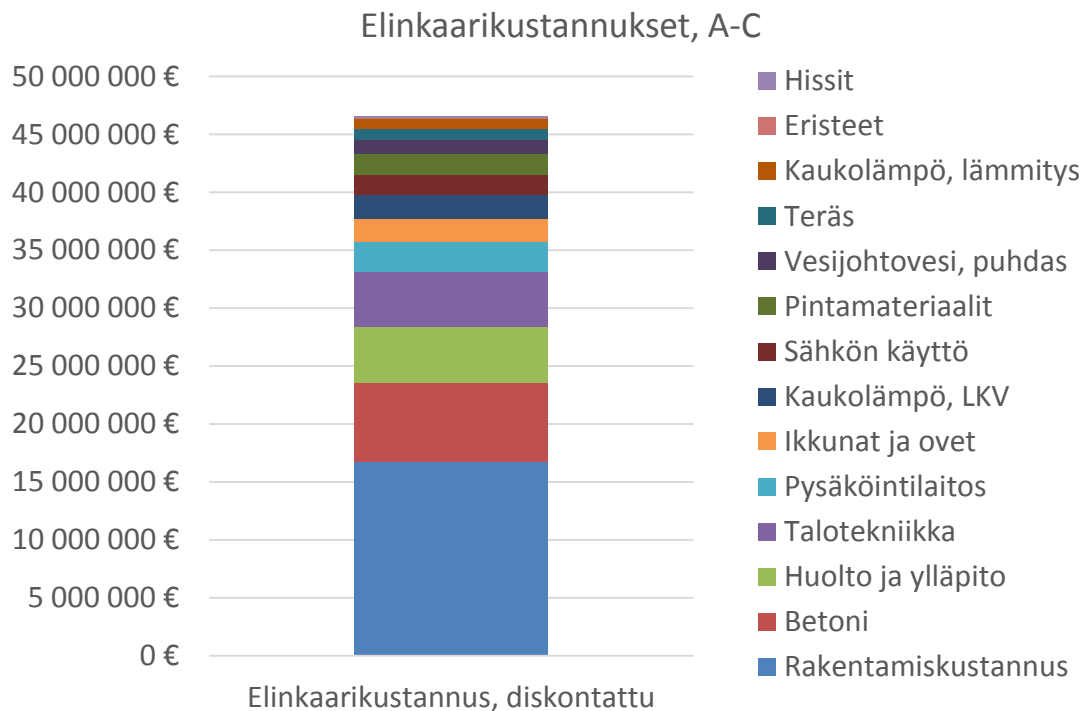
Taulukko 11. Level(s) - elinkaarikustannus – laskennan tulokset, 50 vuoden elinkaari.

Type of Cost	Cost by life cycle stage (€/m ² /yr)			
	A Product and construction stages	B Use Stage		C End of life stage
One off costs	63,4	-		0,7
Annual recurrent costs	-	Energy 4,8	Water 1,3	-
	-	Maintenance, repair, replacement 5		-
Projected non-annual costs	-	2,3		-
Total costs	63,4	13,4		0,7

Rakennuksen elinkaarikustannukset laskettiin myös sille valitulla 100 vuoden elinkaarella. Rakennuksen nettonykyarvoon diskontattu elinkaarikustannus on 46 557 136 € (Kuva 14, Kuva 15).

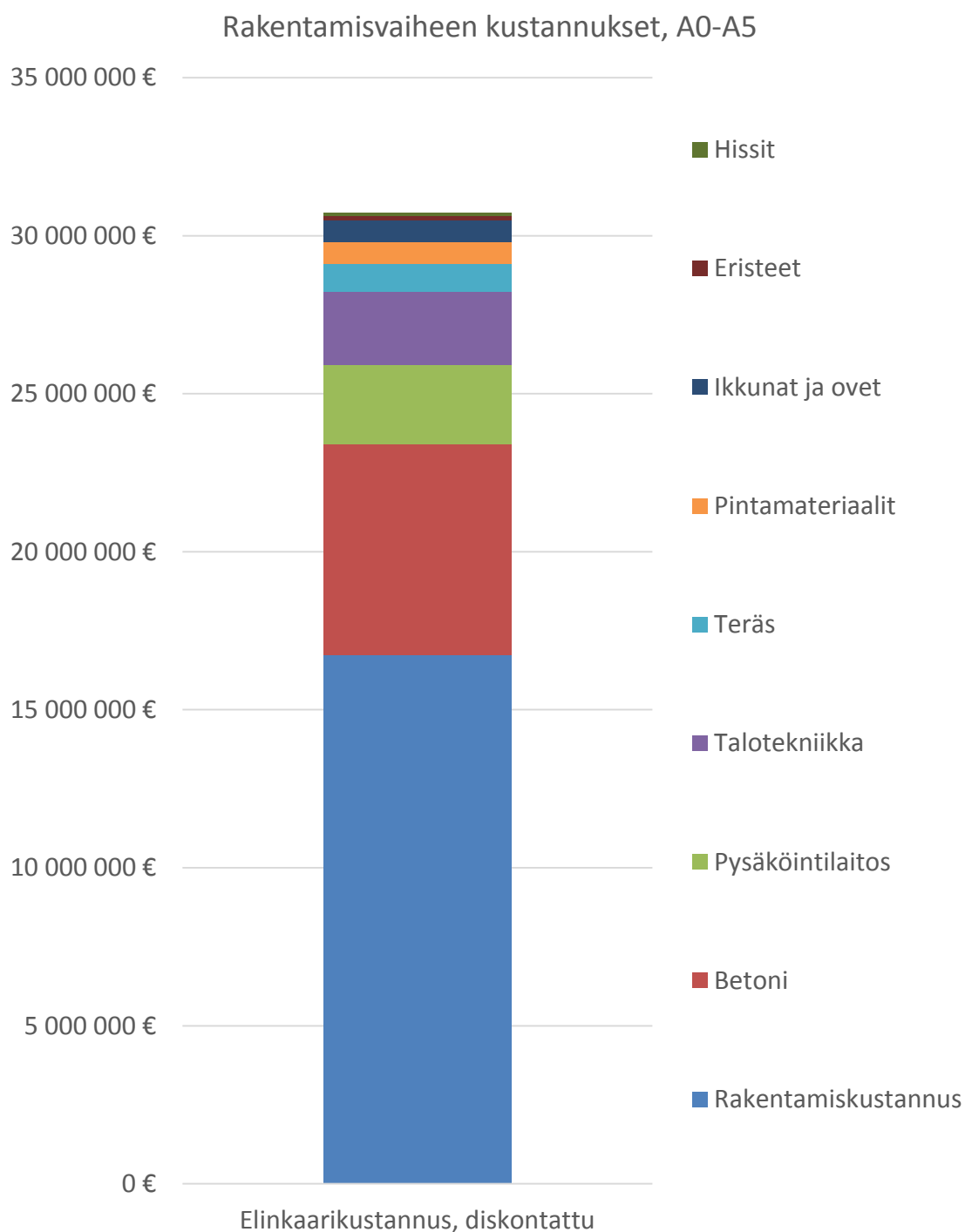


Kuva 14. Elinkaarikustannusten jakautuminen elinkaaren vaiheisiin.

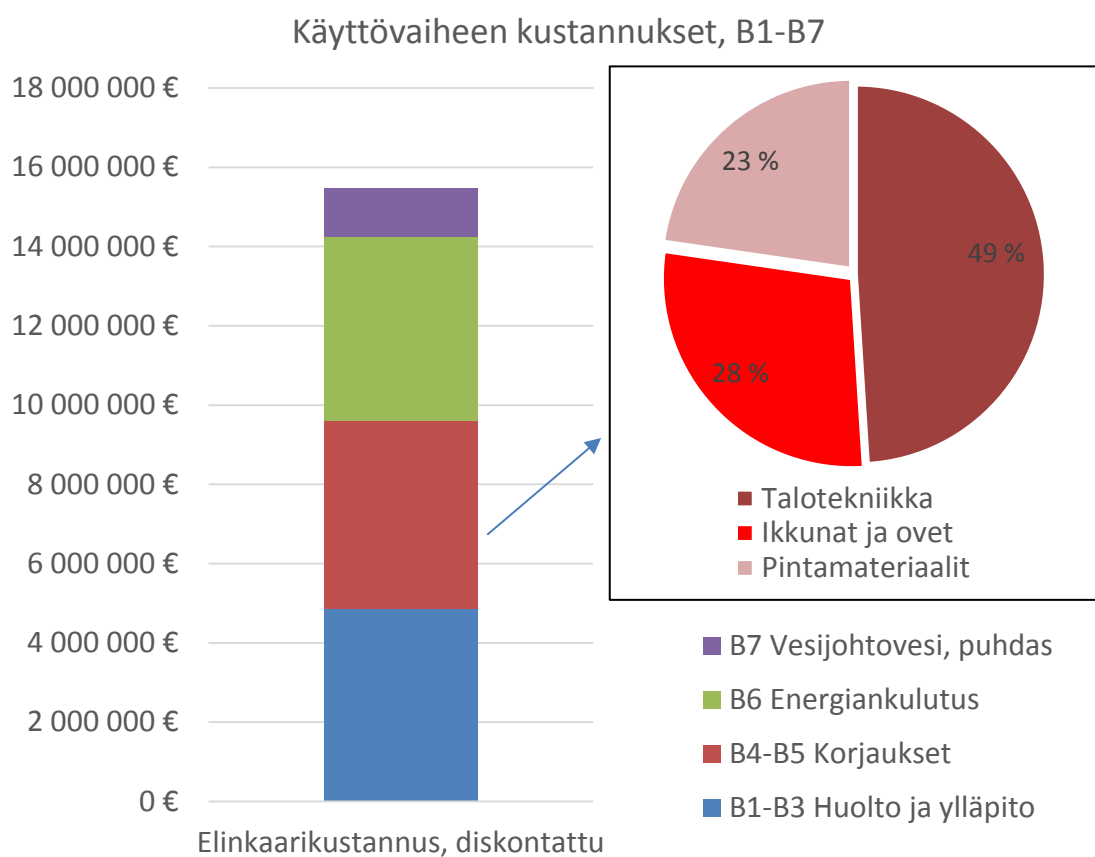


Kuva 15. Elinkaarikustannusten muodostuminen.

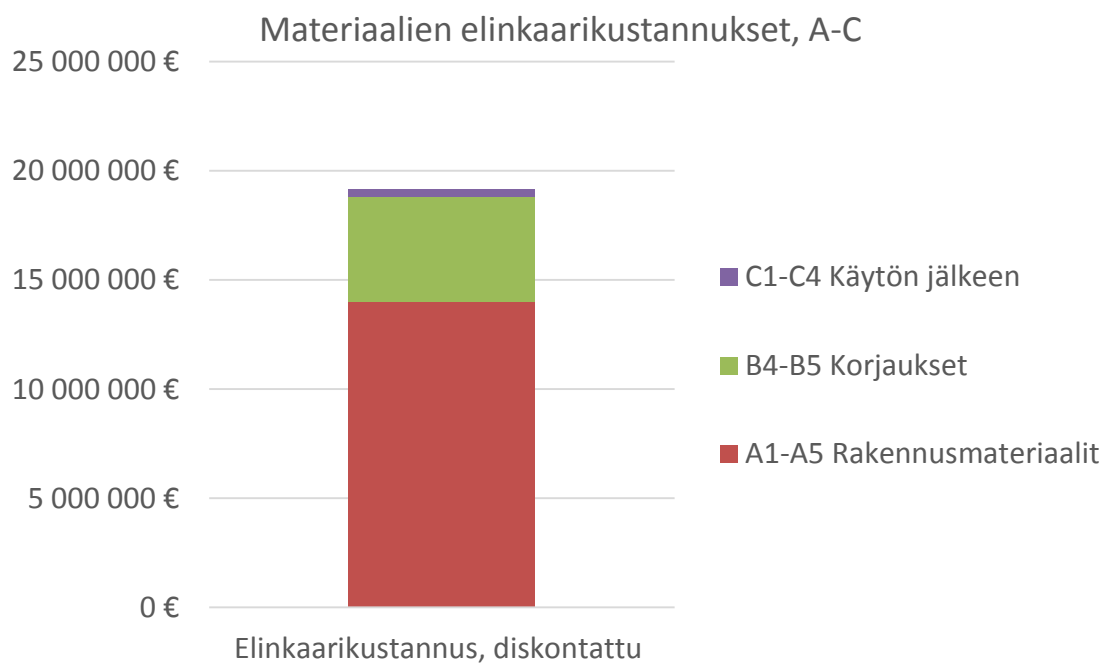
Rakentamisvaiheessa syntyvät kustannukset muodostuvat rakentamisen ja materiaalien kustannuksista (Kuva 16). Käyttövaiheessa syntyvät kustannukset muodostuvat energian ja korjausten kustannuksista (Kuva 18). Rakennusmateriaalien muodostavat kustannuksia kaikissa elinkaaren vaiheissa (Kuva 17).



Kuva 16. Rakentamisvaiheen kustannusten muodostuminen.



Kuva 18. Käyttövaiheen kustannusten muodostuminen.



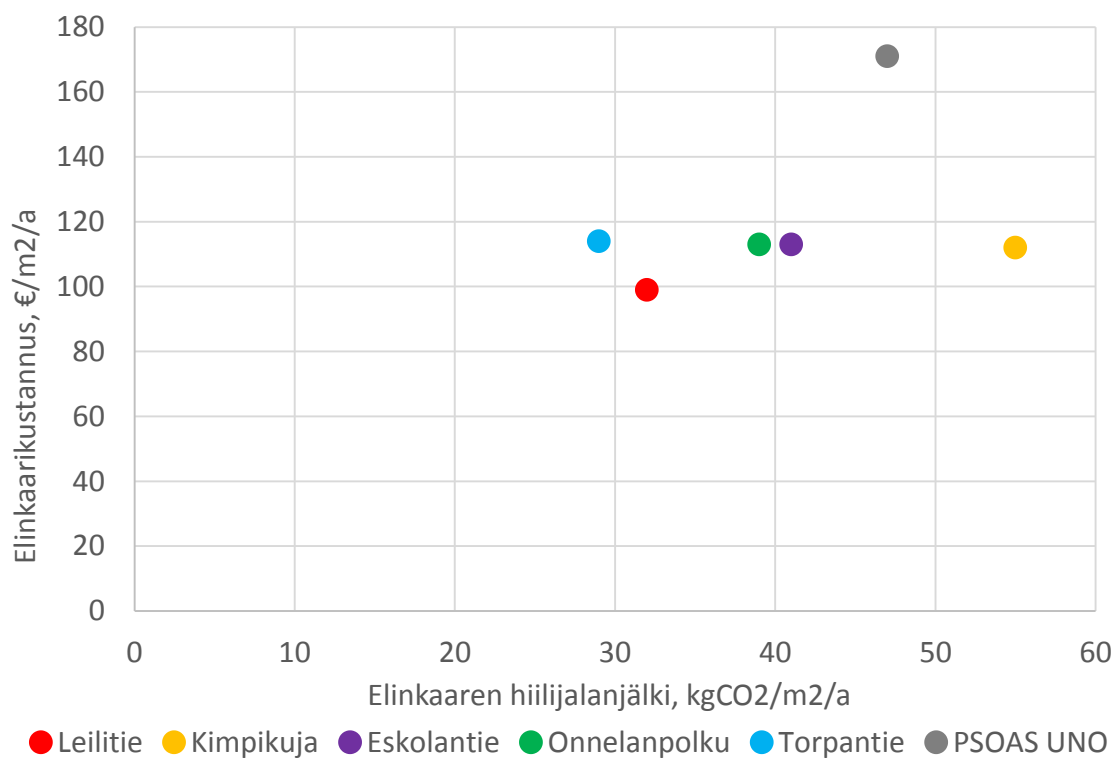
Kuva 17. Rakennusmateriaalien elinkaarikustannusten jakautuminen elinkaaren vaiheisiin.

3.4 Rakennusten vertailutulokset

Vertailuja varten elinkaarikustannukset ja hiilijalanjälki laskettiin 50 ja 100 vuoden elinkaarille ja jaettiin rakennuksen eri pinta-aloilla (Taulukko 12). Tuloksia verrattiin vertailukohteiden hiilijalanjälkiin ja elinkaarikustannuksiin (Kuva 19).

Taulukko 12. Elinkaarilaskennan tuloksia vertailua varten.

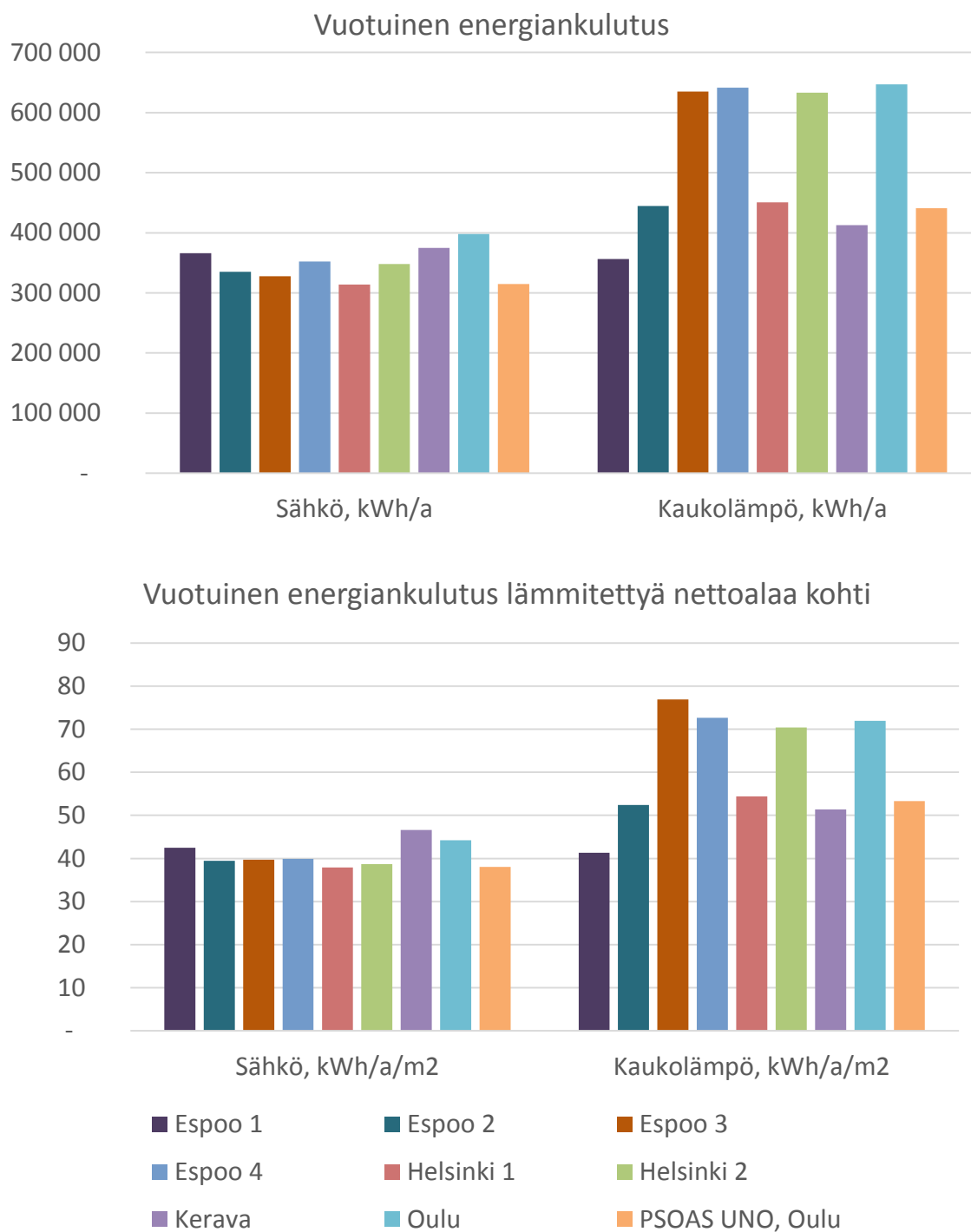
Elinkaari	50 vuotta	100 vuotta
Elinkaaren hiilijalanjälki, [kgCO ₂ e]	10 230 790	17 232 112
Elinkaaren hiilijalanjälki bruttoalaa (9702,5 m ²) kohti vuodessa, [kgCO ₂ e/m ² /a]	21	36
Elinkaaren hiilijalanjälki lämmitettyä nettoalaa (8272 m ²) kohti vuodessa, [kgCO ₂ e/m ² /a]	25	42
Elinkaaren hiilijalanjälki asuntoneliötä (4401 m ²) kohti vuodessa, [kgCO ₂ e/m ² /a]	46	78
Elinkaarikustannukset asuntoneliötä (4401 m ²) kohti vuodessa, [€/m ² /a]	171	106



Kuva 19. Rakennusten elinkaaren hiilijalanjälki ja elinkaarikustannus huoneistoalaa kohti 50 vuoden elinkaarella.

3.4.1 Energiankulutuksen vertailutulokset

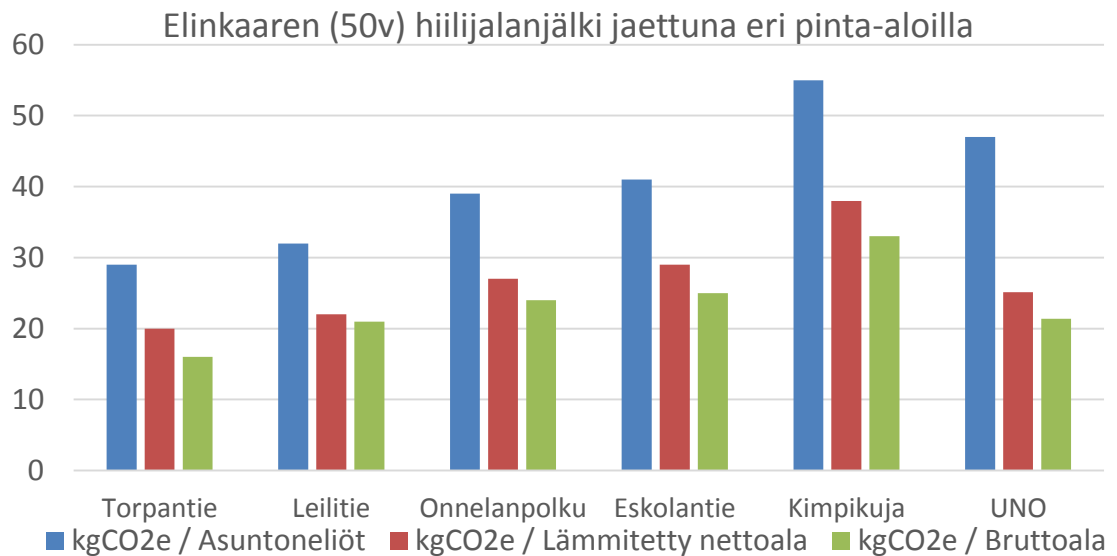
UNO – hankkeen sähkön ja kaukolämmön vuosittaista kokonaiskulutusta sekä kulutusta lämmitettyä nettoalaa kohti vertailtiin kahdeksaan vastaavaan kohteeseen (Kuva 20).



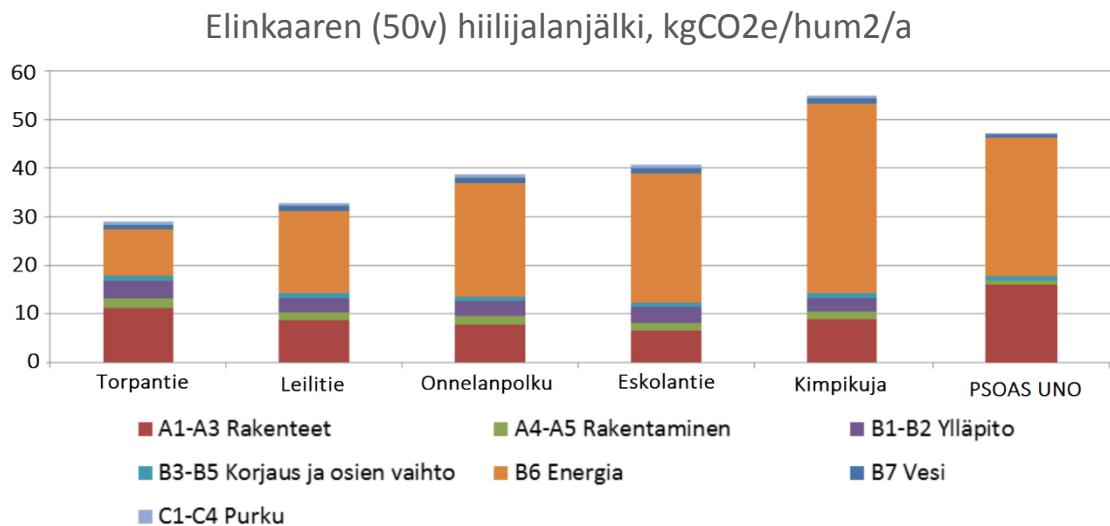
Kuva 20. Energiankulutuksen vertailu vastaaviin rakennuksiin. Rakennukset nimetty sijainnin mukaan.

3.4.2 Elinkaaren hiilijalanjäljen vertailutulokset

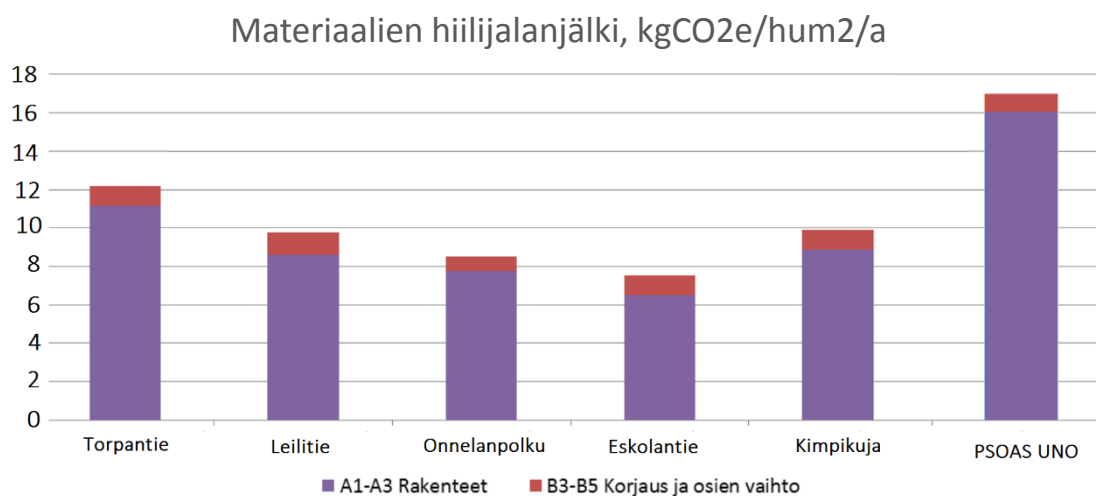
Elinkaaren hiilijalanjälkeä vertailtiin viiden rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen (Kuva 21, Kuva 22). Materiaalien muodostamaa hiilijalanjälkeä vertailtiin samojen rakennusten vastaaviin tuloksiin (Kuva 23).



Kuva 21. Elinkaaren hiilijalanjälki eri pinta-aloja kohti (mukaillen Bionova, 2014).



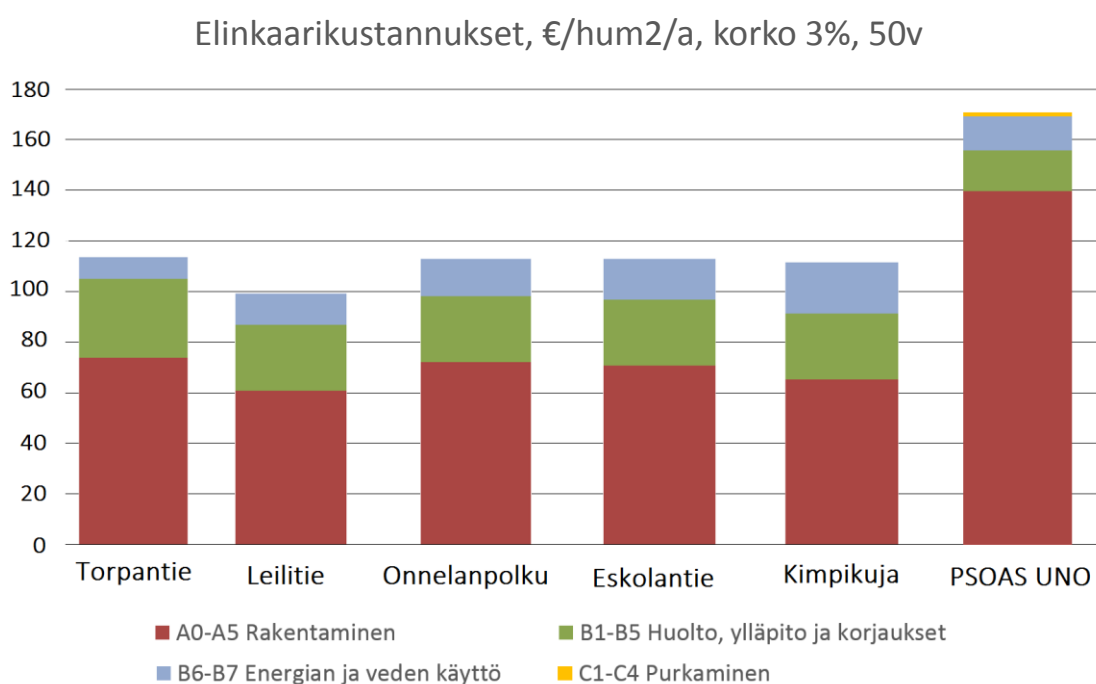
Kuva 22. Elinkaaren hiilijalanjäljen vertailu (mukaillen Bionova, 2014).



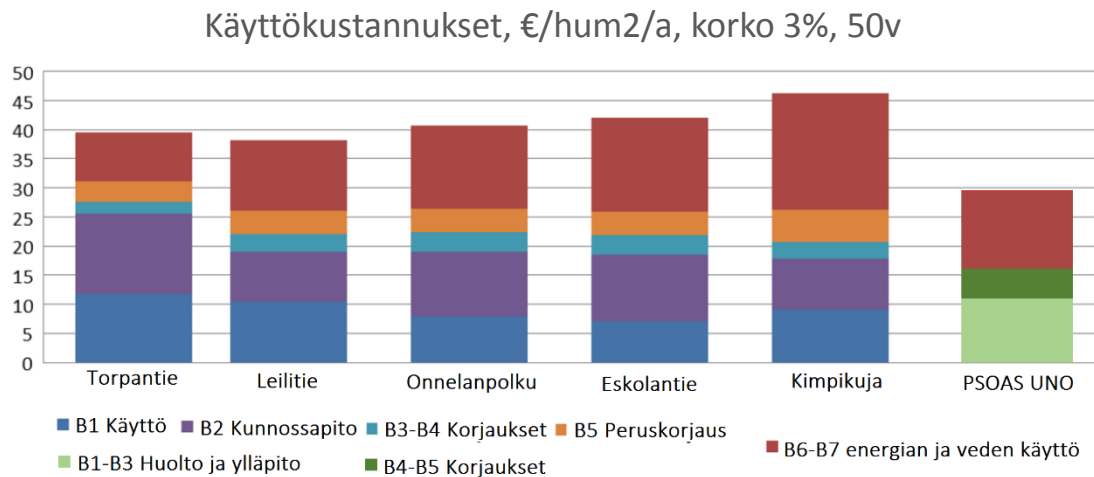
Kuva 23. Materiaalien hiilijalanjäljen vertailu (mukaillen Bionova, 2014).

3.4.3 Elinkaarikustannusten vertailutulokset

Elinkaarikustannuksia vertailtiin viiden rakennuksen elinkaarikustannuksiin (Kuva 24). Käyttövaiheen kustannuksia verrattiin samojen rakennusten vastaaviin (Kuva 25).



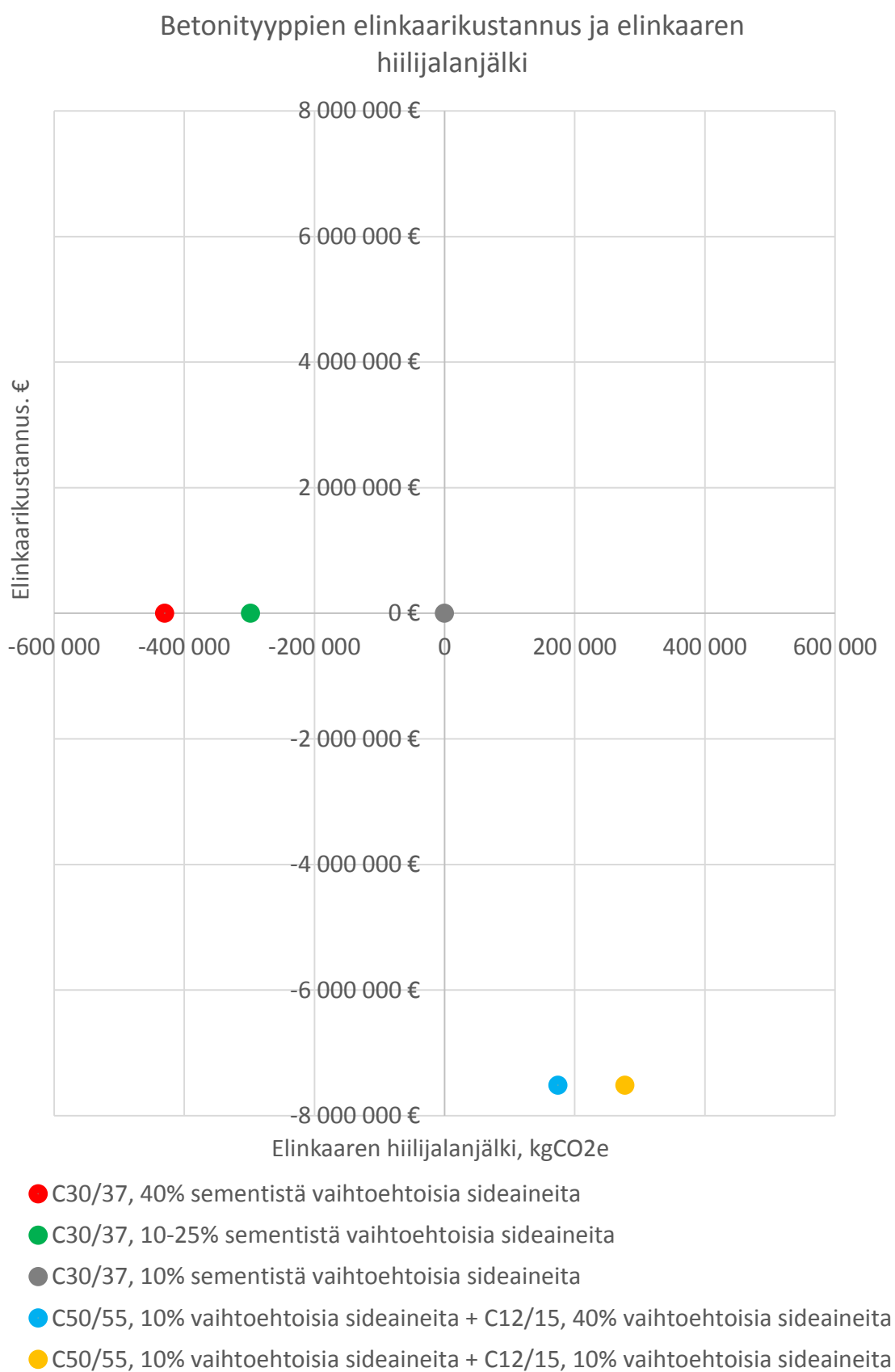
Kuva 24. Elinkaarikustannusten vertailu (mukaillen Bionova, 2014).



Kuva 25. Käyttökustannusten vertailu (mukaillen Bionova, 2014).

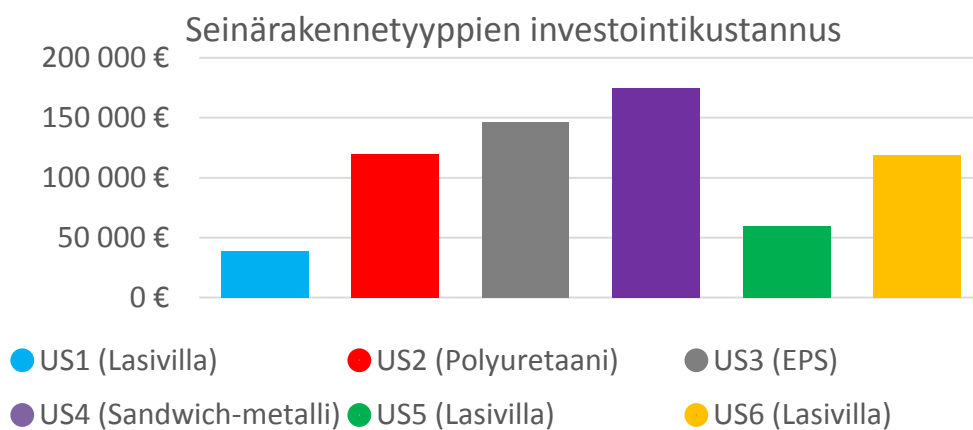
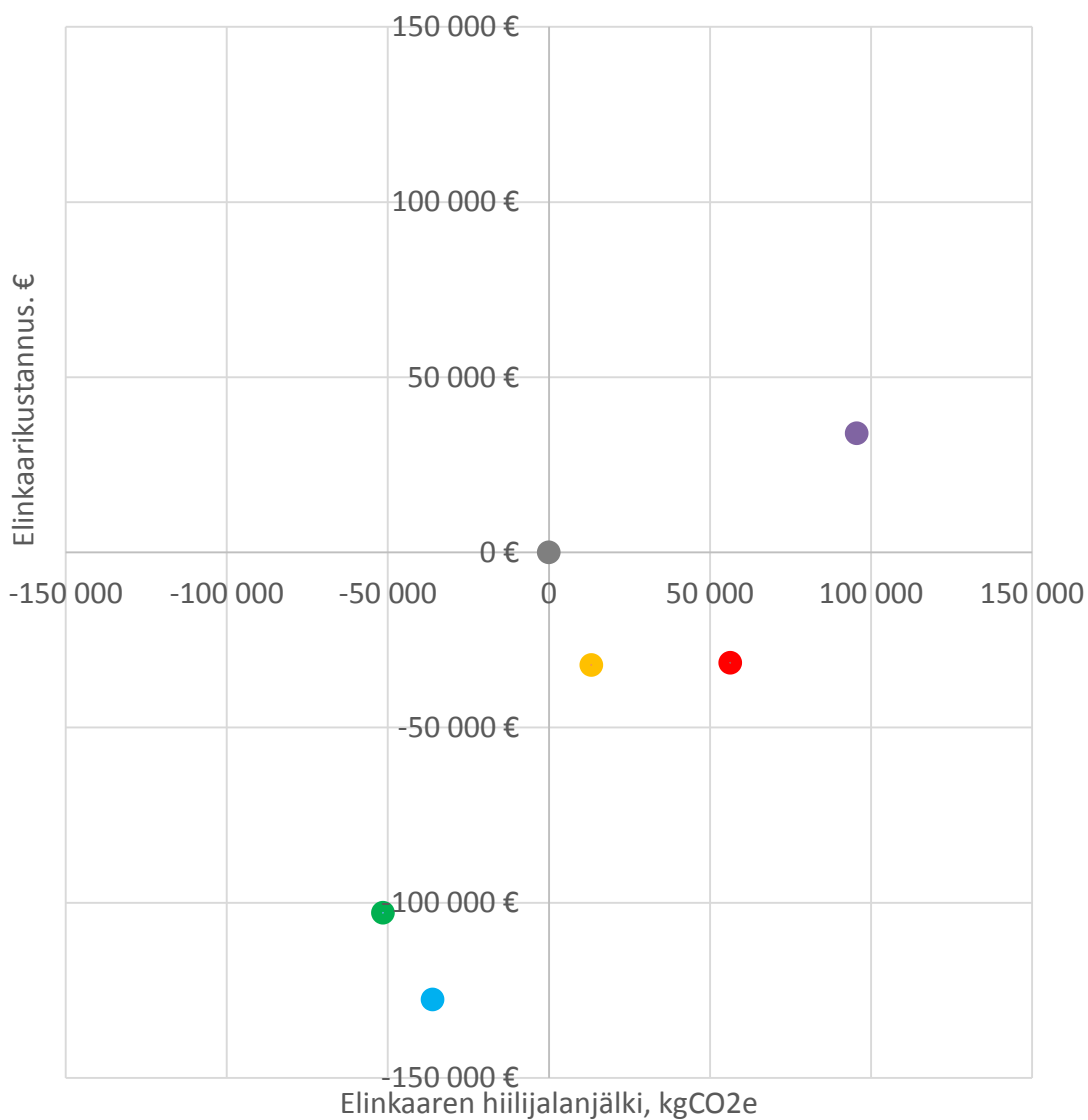
3.5 Rakenneosien vertailutulokset

Rakenneosien vertailututkimusten tulokset on esitelty niin, että hiilijalanjälki kasvaa vaaka-akselilla vasemmalta oikealle ja kustannukset kasvavat alhaalta ylöspäin. Alkuperäistä (origossa sijaitsevaa) vaihtoehtoa edullisempi ja ympäristöystävällisempi ratkaisu löytyy siis kuvaajan vasemmasta alakulmasta. Vertailututkimus tehtiin viidelle betonityypille (Kuva 26), kuudelle seinärakennetyypille huomioimatta energiankulutusta (Kuva 27) ja ottamalla energiankulutuksen vaikutus huomioon (Kuva 28), sekä kuudelle lattiatyypille (Kuva 29).



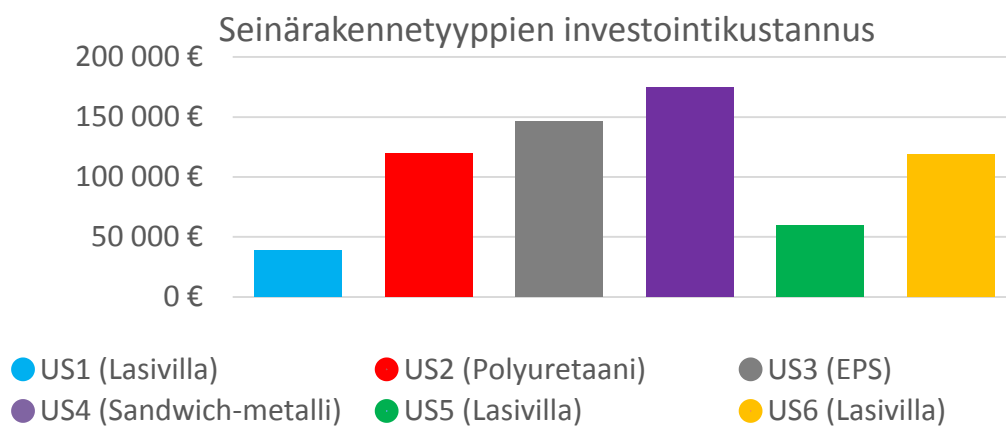
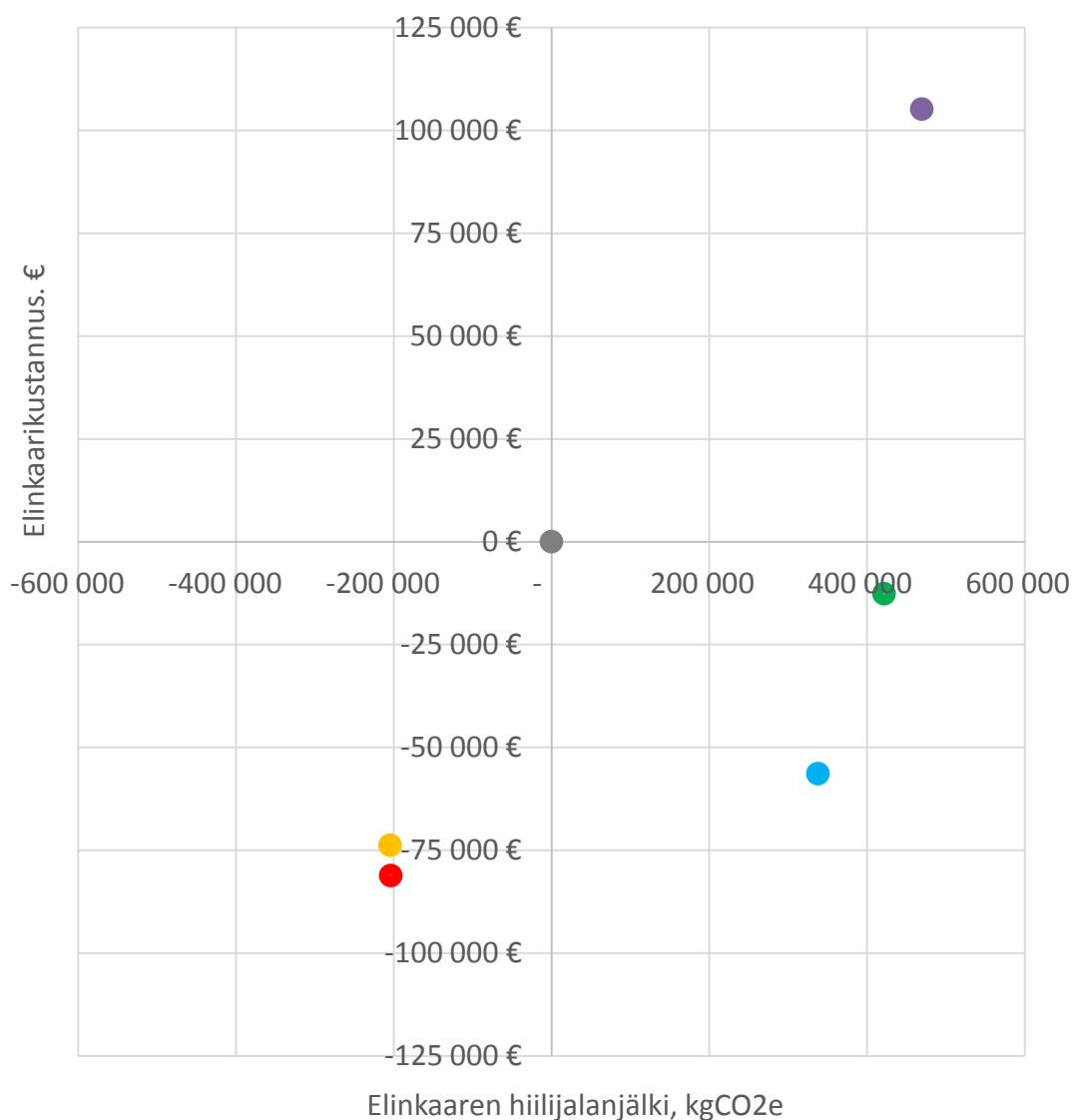
Kuva 26. Betonityyppien vertailu.

Seinärakennetyyppien elinkaarikustannus ja elinkaaren hiilijalanjälki, vaikutusta energiankulutukseen ei huomioitu



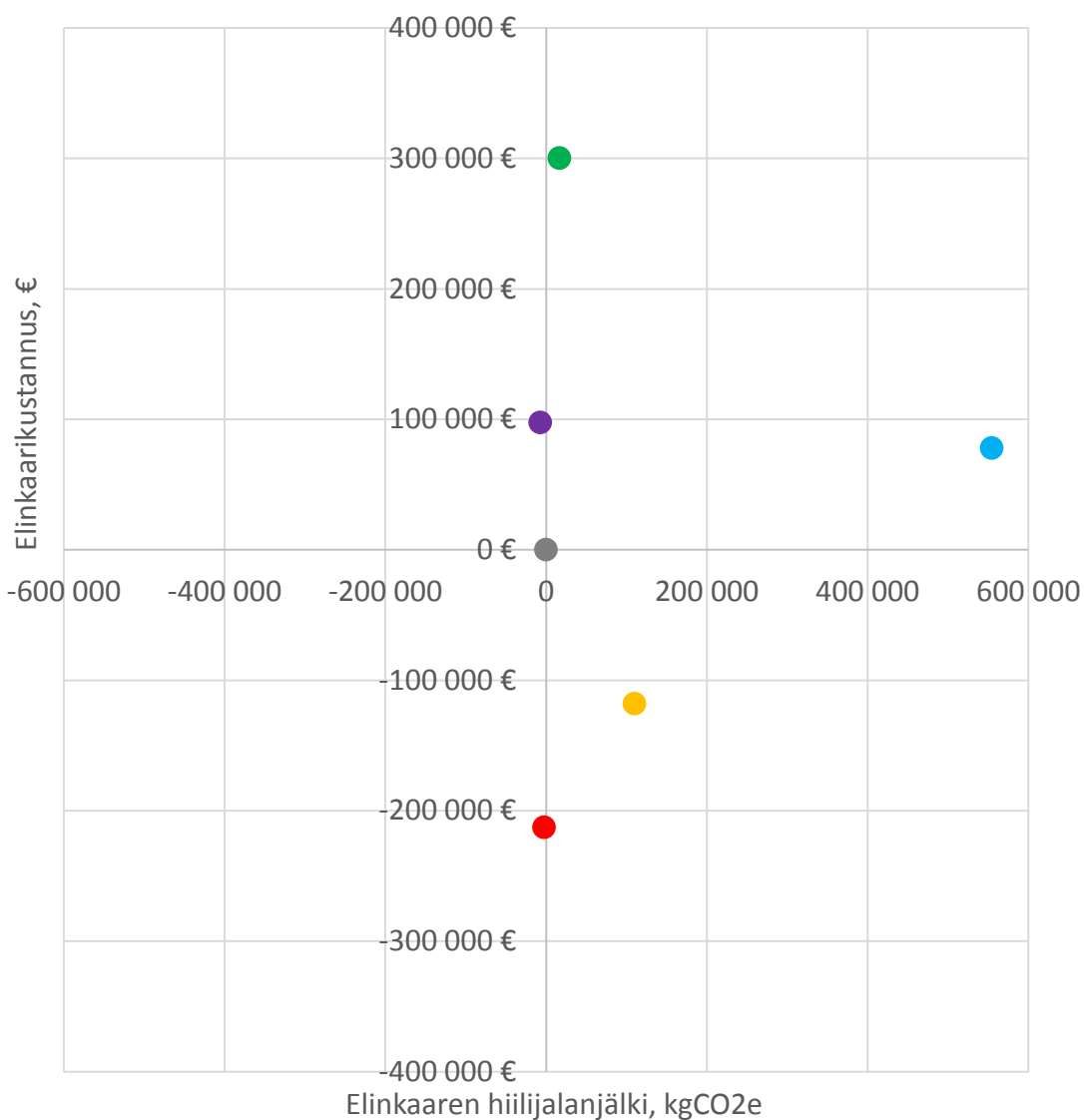
Kuva 27. Seinärakenteiden vertailu, vaikutusta energiankulutukseen ei huomioitu.

Seinärakennetyyppien elinkaarikustannus ja elinkaaren hiilijalanjälki, vaikutus energiankulutukseen huomioitu

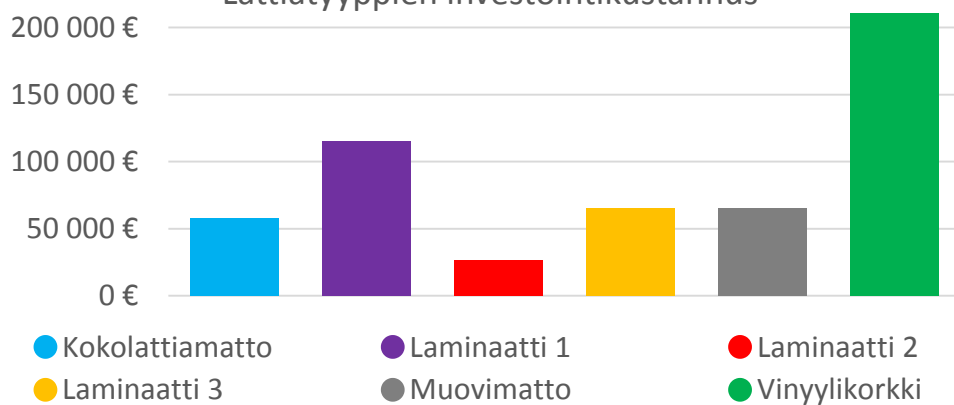


Kuva 28. Seinärakenteiden vertailutulokset, vaikutus energiankulutukseen huomioitu.

Lattiatyyppien elinkaarikustannus ja elinkaaren hiilijalanjälki



Lattiatyyppien investointikustannus



Kuva 29. Lattiatyyppien vertailutulokset.

3.6 Havainnot suunnitteluprosessin ohjaukseen osallistumisesta

Tein vertailulaskelmia kahden vaihtoehdon (korkeat parvelliiset ja matalat parvettomat yläkerrokset) välille. Tulokset osoittivat, että matalampien kerrosten vaihtoehdon energiankulutus vuokrattavaa alaa kohti oli korkeiden kerrosten vaihtoehtoa pienempi. Investoinnin kokonaiskustannus oli matalammilla kerroksilla suurempi, mutta kustannus bruttoneliötä kohti oli pienempi. Matalampien kerrosten vaihtoehdolla saavutettiin myös hieman suurempi vuokrattavan alan osuus kokonaisalasta. Näiden tulosten perusteella PSOAS sr teki päätöksen luopua korkeista parvellisista kerroksista ja suunnittelua jatkettiin matalampien kerrosten osalta. Korkeista kerroksista luopuminen ei kuitenkaan lisännyt vuokrattavan alan osuutta kokonaisalasta riittävästi. Rakentamisen kustannusten syiden selvittäminen osoitti, että suurimpia syitä neliökustannuksen suuruudelle ovat yhteistilojen suuri määrä ja suuret parvekkeet. Näiden tulosten esittely PSOAS sr:n henkilöstölle lisäsi ymmärrystä yhteisten tilojen ongelmallisuudesta rakentamisen kannattavuuden näkökulmasta. Parvekkeet ja yhteiset tilat ovat rakennuksen ulkonäön ja alkuperäisen yhteisöllisyyteen tähtäävän tavoitteen keskeisiä tekijöitä, mutta niiden rakentamisen suuri kustannus ja pieni vaikutus vuokratulojen suuruuteen vaikeuttavat niiden rakentamisen perustelua. Näiden tulosten pohjalta käynnistyi keskustelu vaihtoehtoisista ratkaisuista, joissa yhteisten tilojen määrää saataisiin vähennettyä muuttamatta kuitenkaan rakennuksen perusajatusta. Vaihtoehtoisia suunnitelmia syntyi muutamia. Tarkempaan tarkasteluun päätyi neljä vaihtoehtoa:

1. Kerroksista 2 – 7 yhteiset tilat ja parvekkeet muutettaisiin asunnoiksi.
2. Ylimmän kerroksen yhteistiloista puolet muutettaisiin asunnoiksi.
3. Joka toisen kerroksen yhteistila ja keittiö muutettaisiin avoimeksi tilaksi, jolloin kaksi kerrosta yhdistyisi korkealla oleskelutilalla.
4. Rakennuksen pohjaa kasvatettaisiin 0,5 m kaikkiin suuntiin, jolloin asuntojen pinta-ala kasvaisi.

Tutkin suunnitteluratkaisujen vaikutusta yhteistilojen ja asuntojen pinta-alojen suhteeseen. Tulosten avulla PSOAS sr ohjasi suunnitteluprosessin etenemistä ja valitsi vaihtoehdot, joita suunnitellaan lisää. Diplomityön aikana rakennesuunnittelu ei vielä ehtinyt alkaa, joten koko rakennuksen hiilijalanjäljelle ja elinkaarikustannuksille ei ehditty laskea vertailutuloksia uusista suunnitelmista. Tavoitteena oli käyttää

hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten tuloksia suunnitteluprosessin ohjauksessa, mutta tämä jäi aiottua vähäisemmäksi. Tulosten avulla osoitettiin suurimmat tekijät ja kehoitettiin kiinnittämään näihin huomiota suunnitteluprosessin aikana, mutta suunnittelun eri vaiheiden välisiä tuloksia ei päästy vertailemaan. Materiaalien vertailututkimusten tulokset jäivät myös periaatetasolle ja niiden avulla voitiin vain osoittaa kuinka suuria vaikutuksia materiaaleja vaihtamalla voidaan saavuttaa. Rakennuksen suunnittelu ei ehtinyt edetä niin pitkälle, että olisi päästy tekemään vertailulaskelmia valittujen ja vaihtoehtoisten tuotteiden välille.

Hankkeen aikana tehdyn elinkaarilaskennan esittely herätti keskustelua prosessiin osallistuvien mahdollisuuksista vaikuttaa hiilijalanjälkeen ja elinkaarikustannuksiin. Vaikuttamisen keinot riippuvat paljon henkilön tehtävästä ja asemasta. Kokouksissa, joissa oli paikalla useiden alojen asiantuntijoita ja eri tehtävissä olevia henkilöitä oli mahdollista esittää ajatuksia suunnitteluratkaisuista ja saada välittömästi asiantuntijoiden arviot niiden toteutettavuudesta, kustannuksesta ja vaikutuksesta hiilijalanjälkeen. Tämän tyyppisissä tilaisuuksissa voidaan tehdä periaatepäätöksiä koko hanketta koskevista ratkaisuista ja valinnoista elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Kokouksissa oli havaittavissa aiheeseen liittyvä positiivinen mielenkiinto ja ymmärrys asian tärkeydestä, mutta myös pieni epävarmuus siitä, miten elinkaarilaskennan liittäminen suunnitteluprosessiin vaikuttaa prosessiin osallistuvien työhön ja kenen vastuulla se on. Elinkaarilaskennan tulosten esittely antoi rakennusprosessiin osallistuville näkemyksen siitä, mitkä tekijät vaikuttavat elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen syntyyn ja mahdollisuuden ottaa ne suunnittelussa huomioon.

Rakennuksen elinkaarikustannukset ja hiilijalanjälki laskettiin diplomityön aikana useaan kertaan. Laskentaa tehtiin aina, kun suunnitelmiin tehtiin merkittäviä muutoksia. Diplomityön tarkoitus oli perehtyä laskentaan ja laskentaohjelmiston käyttöön, joten uusia laskelmia tehtiin paljon myös siksi, että aikaisemmissa laskelmissa joitakin asioita ei oltu huomattu ottaa huomioon tai joillekin tiedoille saatiin tarkempia määrittelyksiä. Energiankulutuksen arviota tarkennettiin useaan kertaan, tietomallia täytyi muokata työn aikana tarkemmaksi ja materiaalitiedot tarkentuivat pikkuhiljaa, joten elinkaarilaskentaa suoritettiin jatkuvasti muun tutkimuksen ohessa. Materiaalivaihtoehtojen elinkaarilaskentaa tehtiin diplomityön loppuvaiheessa, kun koko rakennuksen laskennan tulokset olivat selvillä ja niiden perusteella kyettiin valitsemaan materiaalit, joita

kannattaa vertailla. Suunnitteluprosessi oli koko diplomityön ajan hankesuunnitteluvaiheessa, eivätkä suunnitelmat merkittävästi edistyneet, joten elinkaarilaskennan sisällyttämistä suunnitteluprosessiin ei käytännössä päästy kokemaan kuin yhdessä vaiheessa prosessia. Hankesuunnitteluvaiheessa mahdollisuus vaikuttaa suunnittelun ohjaukseen elinkaarilaskennan tulosten avulla on hyvä, koska paljon suunnittelua ja päätöksiä on vielä tulossa. Toisaalta tiedonpuute aiheuttaa haasteita elinkaarilaskennan suorittamiselle. Hankkeen myöhemmässä vaiheessa laskenta tarkentuu, koska arvioiden ja oletusten määrä esimerkiksi materiaalien määrien ja tyyppien osalta vähenee suunnittelun edetessä. Hanke oli kuitenkin jo niin pitkällä, että tietomalli oli olemassa, mikä nopeutti laskentaa. Aikaisemmassa vaiheessa hanketta materiaalien määrien ja energiankulutuksen arviot olisivat olleet vieläkin karkeampia.

4 PÄÄTELMÄT

4.1 Rakennuksen energiatehokkuus

Energiankulutus muodostaa suurimman osan rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä, joten kulutusarvion merkitys korostuu. Energiankulutusta arvioitiin puutteellisilla tiedoilla ja vähäisellä ammattitaidolla. Energiankulutusta arvioitiin ennen rakennusfysikaalista suunnittelua, joten lähes kaikki rakennuksen tekniset ominaisuudet täytyi arvioida. Diplomityön tekijällä ei ollut aikaisempaa kokemusta rakennuksen energiatodistuksen laatimisesta, joka osaltaan aiheuttaa epävarmuutta laskentaan. Energiankulutuksen arvio on suurin epävarmuustekijä tulosten luotettavuudelle.

Rakennukselle lasketun energiatodistuksen mukaan kaukolämmön osuus rakennuksen kokonaisenergiankulutuksesta on noin 85 % (Liite 1). Lämpimän käyttöveden lämmityksen (LKV) osuus kaukolämmöstä on noin 66 %. Energiankulutuksen arvioinnin tuloksia esiteltiin Oulun Energian asiantuntijoille, jotka vertasivat tuloksia uusien kerrostalojen toteutuneisiin kulutuksiin. Heidän mukaansa lämmityksen osuus kaukolämmöstä vaikuttaa liian pieneltä ja kaukolämmön kokonaiskulutus (lämmitys + LKV) on muissa kohteissa suurempi. Laskentaa tehdessä kaikki energiaratkaisut pyrittiin tekemään siten, että energialuokaksi saatiin A ja E-luvuksi alle 90 (minimivaatimus). On mahdollista, että energiatehokkuutta optimoidessa rakenteet ja järjestelmät on arvioitu niin tehokkaiksi, että niitä voi olla haastavaa toteuttaa käytännössä ja energiankulutus on siksi vastaavien rakennusten toteutuneita kulutuksia pienempi. Laskentaa voidaan kuitenkin pitää suuntaa antavana ja energiankulutuksen arvoja voidaan käyttää elinkaarilaskennassa hankesuunnitteluvaiheessa.

4.2 Rakennuksen ekotehokkuus

Elinkaarilaskennan tulosten luotettavuuteen vaikuttaa lähtötietojen laatu, laskentamenetelmä ja laskennan aikana tehdyt oletukset ja rajaukset. Elinkaaren hiilijalanjäljen laskennassa kaikkien käytettyjen materiaalien päästötiedot noudattavat EN 15804 + A1 – standardin mukaista tuotteen ympäristövaikutusten laskentaa ja karakterisointikertoimia ja niitä voidaan pitää olemassa olevan tiedon valossa

luotettavina. Energiankulutuksen päästökertoimina käytettiin Bionova Oy:n laskemia keskiarvoja Suomessa tuotetulle verkkosähkölle ja Oulun Energian kaukolämmölle. Päästökertoimet ovat keskiarvoja, mutta niitä voidaan pitää riittävän tarkkoina arvioina, jotta tuloksia voidaan pitää luotettavana. Työmaalla syntyviä päästöjä arvioitiin Bionova Oy:n pohjoismaiselle rakennustyömaalle laskeman keskiarvon avulla. Työmaalla syntyvien päästöjen arviointi tarkasti on hankesuunnitteluvaiheessa haastavaa, koska siihen vaikuttavat merkittävästi vasta rakentamisvaiheessa tehtävät valinnat, kuten rakennusjätteen kierrättäminen ja työmaalla käytettävän energian tuottamistapa. Tämän vuoksi täytyy olettaa, että keskiarvo pohjoismaisen työmaan rakentamisen aikaisille päästöille on riittävän tarkka arvio tässä vaiheessa hanketta.

Laskentaohjelmiston materiaalitietokanta sisältää yksityiskohtaiset tiedot valmistamisesta syntyvistä päästöistä jokaiselle tuotteelle erikseen. Jotta arvioinnin tulokset mukailisivat mahdollisimman tarkasti todellisia päästöjä, täytyy materiaalien kartoitusvaiheessa jokaiselle rakennusosalle pyrkiä löytämään tietokannasta mahdollisimman hyvin sitä kuvaava tuote. Hankesuunnitteluvaiheessa suurelle osalle materiaaleista ei vielä ole tarkkoja tietoja, joten suuri osa tuotteista valittiin kuvaamaan tyypillistä rakenneosaa. Esimerkiksi betoniksi valittiin C30/37 – lujuusluokan betoni ja eristeiksi EPS ja lasivilla. Osalle rakenneosista ei tietokannasta löytynyt juuri oikeaa tuotetta ja osalle ei oikeaa tuotetta vielä ollut edes valittu, joten on mahdollista, että kartoituksessa valitut tuotteet ovat toteutuvia materiaaleja päästöintensiivisempiä tai päinvastoin. Kartoitus on kuitenkin hankkeen tässä vaiheessa riittävän hyvä ja sitä voidaan jatkossa tarkentaa kun hankkeen edetessä materiaalivalinnat tarkentuvat. Rakennusmateriaalien määrätiedot tuotiin tietomallista, mutta joidenkin rakenteiden suuruudet (kuten seinien leveys ja välipohjien paksuus) olivat arkkitehdin arvioita, koska rakennesuunnittelu oli vielä tekemättä. Rakennuksessa olevien seinien ja välipohjien lukumäärät ovat tietomallissa tarkat, joten materiaalien kokonaismääränkin voidaan olettaa olevan oikeaa suuruusluokkaa, vaikka rakenteiden suuruudet ovatkin arvioita. Materiaalien määrätietojen luotettavuutta on vaikea vielä arvioida, mutta tietomallin vuoksi materiaalimäärien suuruusluokat ovat varmasti riittävän lähellä totuutta. Elinkaariarvioinnista rajattiin pois joitakin materiaaleja sekä talotekniikan ja teknisten järjestelmien osia tiedon puutteen ja laskennan yksinkertaistamisen vuoksi. Elinkaariarvioinnin tulosten voidaan pois rajattujen asioiden vuoksi olettaa olevan

hieman todellisia vaikutuksia pienemmät, mutta pois rajattujen kohteiden vaikutuksen voidaan olettaa olevan melko pieni.

Elinkaaren hiilijalanjäljen suurin tekijä oli käyttövaiheen energiankulutus, tuottaen 71 % elinkaaren hiilijalanjäljestä (Kuva 9). Rakentamisen aikana syntyy 21 % rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä, mutta rakennustyömaan päästöt muodostavat vain 0,2 % elinkaaren hiilijalanjäljestä. Rakennustyömaan päästöjen osuus vaikuttaa pieneltä, joka voi johtua siitä, että rakennustyömaalla syntyvien päästöjen suuruus on arvioitu keskimääräisen tiedon perusteella rakennustyömaan suuruuden mukaan. Energiankulutuksen jälkeen suurin vaikutus elinkaaren hiilijalanjälkeen on betonilla, teräksellä ja talotekniikalla (Kuva 10). Energiankulutus, betoni, teräs ja talotekniikka muodostavat yhdessä lähes 90 % koko rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä. Pysäköintilaitoksen osuus kokonaisuudesta on melko pieni, vaikka se koostuu lähes täysin betonista. Betoni ja teräs muodostavat kumpikin yksinään lähes kolmanneksen koko rakentamisvaiheen hiilijalanjäljestä (Kuva 11). Kaukolämmön kulutus muodostaa noin 70 % ja sähkön kulutus noin 23 % käyttövaiheen hiilijalanjäljestä (Kuva 12). Energiankulutus muodostaa siis yhteensä noin 93 % käyttövaiheen hiilijalanjäljestä. Käyttövaiheen korjaukset muodostavat vain noin 7 % käyttövaiheen hiilijalanjäljestä ja hieman yli puolet korjausten vaikutuksesta syntyy talotekniikasta. Korjausten hiilijalanjäljen suuruuteen vaikuttaa merkittävästi rakenneosien vaihtosykli, joka näkyy myös materiaalien elinkaaren hiilijalanjäljessä: käytön aikaisten korjausten aiheuttama hiilijalanjälki on noin 20 % ja tuotevaiheen hiilijalanjälki noin 75 % materiaalien elinkaaren hiilijalanjäljestä (Kuva 13).

Rakennuksen ympäristöpäästöistä tutkittiin ainoastaan elinkaaren hiilijalanjäljen suuruutta. Elinkaaren hiilijalanjälki kuvaa toiminnasta syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen suuruutta. Rakentaminen synnyttää kuitenkin myös muita päästöjä, kuten maaperää ja vesistöjä happamoittavat päästöt ja yläilmakehän otsonia tuhoavien aineiden päästöt. Hiilijalanjälki ei anna täydellistä kuvaa kaikista rakennuksen elinkaaren aikana syntyvistä päästöistä, eikä pientä hiilijalanjälkeä voida pitää täysin suorana yhteytenä rakennuksen ympäristöystävällisyyteen. Päästövähennyksiin on kuitenkin pyrittävä mahdollisimman nopealla aikataululla ja hiilijalanjäljen pienentäminen on yksi askel kohti ympäristöystävällistä rakentamista.

4.3 Rakennuksen kustannustehokkuus

Rakennuksen investointikustannus bruttoalaa kohti arvioitiin olevan 2 966 – 3 282 €/m² (Taulukko 10). Rakennukseen on suunniteltu melko paljon yhteisiä tiloja, joten asuntoneliötä kohden investointikustannus on huomattavasti korkeampi: 6 538 – 7 236 €/m². Investointikustannukselle on asetettu karkea tavoitearvo (3 000 €/m²), johon tulisi pyrkiä, jotta rakentaminen kannattaa. Bruttoalaa kohti jaettu investointikustannus on lähellä tavoitetta. Asuntoneliötä kohti laskettaessa rakentamisen kustannus on yli kaksi kertaa tavoitearvon suuruinen. Asuinrakennuksessa asuntoneliötä pidetään tuottavina eli on loogista laskea rakentamisen kustannus tuottavaa alaa kohti, jotta voidaan arvioida rakentamisen kannattavuutta. Tässä hankkeessa on alusta saakka haluttu tehdä yhteistiloja ja rakennus on suunniteltu yhteisöllisyyttä silmällä pitäen, joten ainoastaan asuntoneliöiden tarkastelu ei ole tämän hankkeen kannalta reilua. Yhteisten tilojen arvoa on kuitenkin hankala määrittää, koska niistä ei suoraan voi saada vuokratuloja. Tilojen rakentamiskustannukset voidaan määrittää tavoitehinnan erittelyn avulla (Liite 2). Yhteisten oleskelutilojen (1 268,5 m²) rakentamiskustannus on arvion mukaan 4 099 000 €, joka on noin 15 % kokonaiskustannuksesta. Asuntojen (4 401 m²) rakentamiskustannus on 14 907 000 € eli noin 52 %. Jäljelle jäävä noin kolmasosa koostuu kellarin, pesutuvan, portaiden, hissien ja käytävien rakentamisesta. Rakennuksen lämmitetty nettoala on 8272,1 m², josta yhteiset oleskelutilat muodostavat noin 15 % ja asunnot noin 53 %. Kustannukset neliötä kohti ovat yhteistiloille noin 3 230 €/m² ja asunnoille noin 3 390 €/m². Yhteistilojen rakentaminen on vain hieman asuntojen rakentamista edullisempaa, joten yhteistilat kasvattavat investointikustannusta merkittävästi, mutta lisäävät rakennuksen arvoa ja tuottavuutta vain vähän.

Investointikustannuksesta suurimman osan muodostavat rakennustekniset työt (Liite 2), muodostaen hieman yli 70 % investointikustannuksesta. Rakennuttajan kustannukset ja LVI – työt muodostavat kumpikin noin 10 % ja sähkötyöt noin 5 % investointikustannuksesta. Rakennus sisältää myös tavanomaisesta poikkeavia ratkaisuja, jotka kasvattavat kustannuksia. Jokaisessa kerroksessa on lähes 50 m² parveke, jonka tukeminen vaatii pitkän jännevälinsä vuoksi jatkosuunnittelua. Parvekkeet kasvattavat kustannuksia sekä suunnittelu-, että rakentamisvaiheessa. Suurten parvekkeiden myötä asuntoneliöiden määrä bruttoneliötä kohden pienenee, joka osaltaan kasvattaa

kustannusten suuruutta asuntoneliötä kohden. Rakennuksessa on kaksi kerrosta, joissa parvekkeiden suunta vaihtuu ja kaikkien yläpuolella olevien kerrosten kantava ulkoseinä täytyy tukea laattaan (Kuva 7). Tämä aiheuttaa lisätyötä rakennesuunnittelussa ja rakentamisessa. Rakennus sisältää lisäksi paljon ja melko suuria ikkunoita, joka vaikeuttaa kuormien siirtämistä ulkoseinillä ja lisää sekä suunnittelun, että rakentamisen kustannuksia. Rakennuksen suunnittelu ja rakentaminen tulevat nykyisen suunnitelman mukaan varmasti olemaan tavanomaista rakennusta kalliimmat ja yhteistilojen suuren määrän vuoksi kustannus asuntoneliötä kohti on käytännössä mahdotonta saada tavoitteeseen. Investointikustannusten suuruuden vuoksi kannattaa panostaa rakennuksen elinkaarikustannuksen optimointiin.

Rakenneosien yksikköhinnat valittiin ohjelmiston tietokannan oletusarvoiksi. Oletusarvot ovat tuotteiden markkinahinnan keskiarvoja. Yksikkökustannuksissa on suuria eroja riippuen tuotteen toimittajasta ja työmaan sijainnista. Ohjelmiston oletusarvoissa esimerkiksi kahden eri lujuusluokan betonin yksikkökustannus oli sama, vaikka todellisuudessa lujempi betoni on yleensä kalliimpaa. Koska rakennukselle laskettiin investointikustannus erikseen, ei materiaalien yksikkökustannuksilla ole arvioinnin lopputulokseen vaikutusta. Hankkeen edetessä, kun materiaaleille saadaan tarjouksia, voidaan tuotteille käyttää tarjousten yksikköhintoja tarkemman arvion saamiseksi. Hankkeen tässä vaiheessa tarkkojen hintojen selvittäminen vaatisi huomattavasti enemmän resursseja. Rakennusmateriaalien suunniteltu käyttöikä määrittelee, kuinka monta kertaa rakennuksen elinkaaren aikana materiaalit uusitaan. Materiaalien käyttöiät valittiin ohjelmiston oletusarvoiksi, jotka voivat poiketa toteutuvista riippuen valittavasta tuotteesta. Vaihutosyklar arviointi aiheuttaa epävarmuutta tuloksiin ja hankkeen edetessä täytyy rakenneosien vaihtosyklit suunnitella tarkemmin, jotta tuloksista saadaan luotettavimmat.

Elinkaarikustannusten selkeästi suurin tekijä oli rakentamisvaiheen kustannus, eli investointikustannus (Kuva 14). Käyttövaiheen huolto ja ylläpito, korjaukset, sekä energiankulutus muodostavat jokainen noin kymmenesosan elinkaarikustannuksista. Käytön aikaisten kustannusten diskonttaus nettonykyarvoon aiheuttaa sen, että niiden osuus elinkaarikustannuksista on selkeästi pienempi kuin käytön aikaisen hiilijalanjäljen osuus elinkaaren hiilijalanjäljestä. Rakentamiskustannus (ei sisällä materiaaleja) on noin 36 % koko rakennuksen elinkaarikustannuksesta (Kuva 15). Toisin kuin hiilijalanjäljessä

teräksen osuus elinkaarikustannuksista on hyvin pieni. Betonin osuus sen sijaan on edelleen rakennusmateriaaleista suurin. Betonin elinkaarikustannus on huolto- ja ylläpitokustannuksiakin suurempi, noin 15 % koko rakennuksen elinkaarikustannuksesta. Rakentamisvaiheen kustannuksissa betonin osuus (22 %) on lähes yhtä suuri kuin kaikkien muiden materiaalien osuus (24 %) yhteensä (Kuva 16). Huolto ja ylläpito, korjaukset, sekä energiankulutus muodostavat jokainen noin kolmanneksen käyttövaiheen kustannuksista (Kuva 18). Energiankulutuksen osuus käyttövaiheen kustannuksista (30 %) on siis paljon pienempi kuin käyttövaiheen hiilijalanjäljestä (93 %). Käyttövaiheen korjausten kustannukset jakautuvat talotekniikan, ikkunoiden ja ovien, sekä pintamateriaalien kesken lähes samalla tavalla kuten korjausten hiilijalanjälki: talotekniikka muodostaa hieman alle puolet korjausten kustannuksista. Materiaalien elinkaarikustannuksista käyttövaiheen korjausten osuus on noin 25 % ja rakennusvaiheen kustannusten osuus noin 73 % (Kuva 17), eli materiaalien elinkaarikustannuksissa korjausten osuus on hieman suurempi kuin materiaalien elinkaaren hiilijalanjäljessä.

4.4 Rakennusten vertailuaineiston arviointi

Tuloksia voidaan pitää vertailukelpoisina muihin Level(s) – elinkaaren hiilijalanjälki ja elinkaarikustannus – mittareilla arvioituihin kohteisiin. Tuloksia voidaan vertailla myös kaikkiin kohteisiin, joiden elinkaaren hiilijalanjälki on laskettu EN 15978 – standardin mukaisesti ja elinkaarikustannukset standardin EN 16627 mukaisesti. Vertailussa täytyy ottaa huomioon, missä vaiheessa hanketta arviointi on tehty. Tämä arviointi suoritettiin hankesuunnitteluvaiheessa, joten sen vertailu esimerkiksi valmiiseen rakennukseen, jonka arviointi on tehty toteutuneista materiaalityömituksista ja energiankulutuksesta ei ole mielekäästä. Vertailtaessa kohteiden elinkaariarviointien tuloksia täytyy rakennusten elinkaarten pituuksien olla yhtä suuret, jonka vuoksi kohteelle tehtiin arvio 50 ja 100 vuoden elinkaarella. Rakennusten vertailututkimuksessa vertailuun valittiin suuruudeltaan, rakennusmateriaaleiltaan ja käyttötarkoitukseltaan erilaisia rakennuksia, koska kattavia tuloksia täysin vastaavasta hankkeesta ei löydetty. Erilaisten rakennusten vertailussa täytyy ottaa huomioon, että eroja syntyy rakennusten eroavaisuuksienkin vuoksi. Esimerkiksi perustukset vaihtelevat riippuen rakentamispaikasta ja rakennuksen tyypistä. Puurunkoisen talon elinkaaren hiilijalanjäljen voidaan betonin päästöintensiteetinsä vuoksi olettaa olevan vastaavaa betonirunkoista pienempi.

Rakennuksen pinta-ala ja kerrosluku vaikuttavat rakennuksen muotoon ja esimerkiksi ulkoseinien määrään. Ulkoseinien määrä vaikuttaa tarvittavan runkomateriaalin määrään sekä rakennuksen energiankulutukseen. Osassa kohteista tiedot energiankulutuksesta on arvioitu, osassa se on laskettu toteutuneista kulutuksista. Myös rakentamiskustannus on osassa rakennuksista laskettu toteutuneista, osassa arvioituista kustannuksista.

Rakennuksen energiankulutuksen vertailututkimuksessa todettiin, että sähkön kulutus on yhtä suuri vertailukohteista pienimpien kulutusten kanssa (Kuva 20). Kaikkien vertailtujen rakennusten sähkön kulutus oli 300 000 – 400 000 kWh/a välillä, kun UNO – hankkeelle laskettu sähkön kulutus oli 314 733 kWh/a. Sähkön kulutus on hieman keskiarvoa matalampi, mutta samaa suuruusluokkaa kaikkien vertailtujen kohteiden kanssa. Kaukolämmön kulutuksessa vertailukohteiden tulokset jakautuivat kahteen ryhmään: osassa kohteista kaukolämmön kulutus oli hieman yli 400 000 kWh/a ja osassa kohteista hieman yli 600 000 kWh/a. UNO – hankkeen kaukolämmön kulutus oli 440 880 kWh/a, joten se on samaa luokkaa kolmen vertailukohteen kanssa. Energiankulutuksia vertailtiin myös lämmitettyä nettoalaa kohti, jotta huomioitiin eroavaisuudet rakennusten suuruudessa. Sähkön ja kaukolämmön kulutukset olivat myös lämmitettyä nettoalaa kohden laskettuna samalla tasolla vertailtavien kohteiden kanssa. Ainoan samalla paikkakunnalla sijaitsevan rakennuksen sähkön ja kaukolämmön kulutukset olivat selvästi UNO – hankkeelle laskettuja suuremmat. Rakennukselle laskettu energiankulutus on karkea arvio, mutta tämän vertailututkimuksen perusteella se on samaa suuruusluokkaa muiden vastaavan kokoluokan rakennusten kanssa, joten sitä voidaan käyttää elinkaariarvioinnissa.

Elinkaaren hiilijalanjäljen vertailukohteiden tulokset on esitelty pääasiassa asuntoneliötä kohti. UNO – hankkeen sisältämien yhteistilojen vuoksi kaikki tulokset asuntoneliötä kohden esiteltynä ovat hankkeen kannalta epäedullisia. Tämän osoittamiseksi elinkaaren hiilijalanjälkeä vertailtiin ensin asuntoneliöillä, lämmitetyllä nettoalalla ja bruttoalalla jaettuna (Kuva 21). Vertailussa todettiin, että bruttoalaa ja lämmitettyä nettoalaa kohti rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki on ainoastaan Torpantien ja Leilitien kohteita suurempi, mutta asuntoneliötä kohti se on toiseksi suurin: ainoastaan Kimpikujan kohteen elinkaaren hiilijalanjälki on tällöin suurempi. UNO – hankkeessa rakenteista muodostuva hiilijalanjälki on selkeästi vertailukohteita suurempi (Kuva 22). Sen sijaan ylläpidon ja rakentamisen osuudet ovat muissa kohteissa selkeästi suurempia. Energiankulutuksen

osuus on hieman keskiarvoa suurempi, mutta samaa luokkaa muiden kohteiden kanssa. Rakenteiden suuri osuus voidaan todeta myös vertaamalla ainoastaan materiaalien muodostamaa elinkaaren hiilijalanjälkeä (Kuva 23). UNO – hankkeen elinkaaren hiilijalanjäljen laskennassa ei ole arvioitu ylläpidosta muodostuvaa hiilijalanjälkeä lainkaan. Arvioinnissa otettiin käytön aikaisesta huollosta huomioon ainoastaan korjauksista ja osien vaihdoista muodostuva hiilijalanjälki. Materiaalien selkeästi muita kohteita suurempi osuus johtuu muutamasta tekijästä. UNO – rakennuksen yhden kerroksen pinta-ala on melko pieni, joka tarkoittaa sitä, että rakennuksen bruttoalaan nähden siinä on melko paljon seinäpinta-alaa. Yleisesti ottaen suurempi kerrosmäärä samalle bruttoalalle tarkoittaa suurempaa seinäpinta-alaa. Suurempi seinien määrä tarkoittaa suurempaa määrää betonia, joten pistemäisyytensä vuoksi tässä rakennuksessa on pinta-alaansa nähden vertailukohteita suurempi määrä betonia ja betoniraudoitusta. Betonin ja teräksen suuri osuus materiaalien hiilijalanjäljestä selittää osaltaan rakennuksen vertailukohteita suurempaa materiaalien hiilijalanjälkeä. Tulokset on myös esitetty asuntoneliötä kohden, joka on UNO – hankkeen kannalta epäedullista. UNO on ainoa kohde joka on betonirakenteinen ja paaluperustettu. Paalutus sisältää myös paljon betonia ja terästä. Eskolantien kohde on vertailukohteista bruttoalaltaan lähimpänä UNO – hanketta. Eskolantien kohde on myös tehty paaluperustuksella, mutta sen runko- ja verhouksimateriaalina on käytetty puuta. Puurakenteen, sekä edellä mainittujen UNO – hankkeen tekijöiden vuoksi sen rakentamisvaiheen hiilijalanjälki asuntoneliötä kohti on noin puolet UNOn vastaavasta. Torpantien kohteen suunnittelussa on tavoiteltu lähes nollaenergiatasoa ja Leilitien kohteessa on tavoiteltu passiivienenergiatasoa. Näiden kohteiden energiankulutuksen hiilijalanjäljet ovat vertailukohteista pienimmät ja selkeästi UNOn vastaavaa pienemmät. Onnelanpolun ja Eskolantien kohteiden energiankulutuksen hiilijalanjälki on UNOn tasolla. Niissäkin tavoitteena on ollut matala energiankulutus, mutta kohteet ovat selkeästi muita suurempia, jolla voi olla vaikutusta energiankulutuksen suuruuteen.

Kuten elinkaaren hiilijalanjäljessä, myös elinkaarikustannukset on jaettu asuntoneliölle, joka on UNO – hankkeen kannalta epäedullista. UNOn rakentamisen kustannus on noin kaksi kertaa vertailukohteiden suuruinen (Kuva 24). Kaikkien vertailukohteiden rakentamiskustannukset pohjautuvat rakentamisurakan hintaan, eli todellisiin kustannuksiin, kun UNO – hankkeen rakentamisenkustannukset perustuvat tavoitehintamenetelmällä laskettuun investointikustannusarvioon.

Investointikustannusarviossa arvioitiin rakentamisen olevan tavanomaista kalliimpaa, joten oli odotettavissa, että rakentamisen kustannus on vertailukohteita suurempi. Eron ei kuitenkaan odotettu olevan näin suuri. Käyttövaiheen kustannukset ovat selkeästi vertailukohteita pienemmät, mikä nähdään käyttökustannusten vertailusta (Kuva 25). UNO – hankkeelle käytön kustannuksia arvioitiin vain huollon, korjausten ja energiankäytön osalta. Vertailukohteiden käyttökustannukset perustuvat joko toteutuneisiin kustannuksiin tai yhtiöiden vastaavien kohteiden perusteella tekemiin arvioihin. Vertailukohteiden käyttökustannukset on tarkempia ja jaettu useampaan elinkaaren vaiheeseen kuin UNO – hankkeelle. Energiankulutuksen kustannukset vaihtelevat melko suuresti. UNOn energiankulutuksen kustannus on vertailukohteiden tasolla. Vertailukohteissa peruskorjaukset ja korjaukset on huomioitu omina osioinaan, UNOn arvioinnissa ne on yhdistetty. Korjausten osuus on hieman vertailukohteita pienempi, mutta samaa luokkaa. Huollon ja ylläpidon kustannusten arvioitiin UNOlle olevan 5 €/ brm². Vertailukohteiden käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat selkeästi suuremmat ja niitä on arvioitu perusteellisemmin kuin tässä arvioinnissa. Käyttövaiheen kustannukset ovat UNOn arvioinnissa todennäköisesti todellista pienemmät käyttö- ja kunnossapitokustannusten aliarvioinnin vuoksi.

4.5 Rakennesien vertailuaineiston arviointi

Olemassa olevan suunnitelman mukaan rakennuksessa on noin 6 000 m³ betonia. Se on energiankulutuksen jälkeen suurin tekijä elinkaaren hiilijalanjäljessä ja yksi suurimmista tekijöistä elinkaarikustannuksissa. Betonin hiilijalanjälkeä pienentämällä voitaisiin vähentää rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä merkittävästi. Vertailututkimuksessa betonityyppien yksikköhintoja käytettiin ohjelmiston keskiarvoja sen sijaan, että olisi selvitetty valmistajien hintatietoja. Tämän vertailututkimuksen päätavoite oli tutkia kuinka suuri potentiaali ympäristöystävällisemmän betonin käyttämisessä elinkaaren hiilijalanjäljen kannalta on. Kaikkien vertailtujen betonityyppien kustannus on sama, mikä todellisuudessa tuskin pitää paikkansa, joten tämän vertailun perusteella ei voida tehdä päätöksiä valittavasta betonista. Seuraavaksi täytyisi selvittää valmistajilta todelliset kustannukset eri betonityypeille, jonka jälkeen voitaisiin vertailla elinkaaren hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten yhteisvaikutuksia. Vertailu tehtiin myös vaihtoehdolle, jossa kaksi kolmasosaa betonista on suuremman ja yksi kolmasosa

pienemmän lujuusluokan betonia. Oletus oli, että suuremman lujuusluokan betonin valmistus vaatii enemmän sementtiä ja tuottaa siksi suuremman hiilijalanjäljen. Tulokset osoittivat, että vaikka C12/15 – lujuusluokan betonissa 40 % sementistä korvataan vaihtoehtoisilla sideaineilla, on vaihtoehtoisen yhdistelmän elinkaaren hiilijalanjälki tavanomaista suurempi (Kuva 26). Käyttämällä vaihtoehtoisia sideaineita sementin tilalla voidaan betonin hiilijalanjälkeä kuitenkin pienentää. Vertailussa 6 000 m³ tavanomaista betonia muodosti noin 1 800 000 kgCO₂e suuruisen hiilijalanjäljen. Korvaamalla 40 % sementistä vaihtoehtoisilla sideaineilla voidaan saman betonimäärän hiilijalanjälkeä pienentää yli 400 000 kgCO₂e, joka on hieman yli 20 % (Kuva 26).

Nykyisessä suunnitelmassa rakennuksen eristeiden määrät ja tyypit ovat karkeita arvioita. Eristetyyppi ja määrä vaikuttavat seinän U-arvoon ja koko rakennuksen energiankulutukseen. Eristetyypillä ja määrällä on vaikutus myös materiaalien hiilijalanjälkeen. Seinärakennevertailussa haluttiin tutkia muutaman erilaisen vaihtoehdon eroja. Tarkasteltaessa ainoastaan materiaalien vaikutuksia nähdään, että US1 (tuulensuojaeriste ja 100 mm lasivilla) ja US5 (200 mm lasivilla) ovat tavanomaista ratkaisua edullisempia ja tuottavat pienemmän hiilijalanjäljen (Kuva 27). Koko rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä noin 96 500 kgCO₂e ja elinkaarikustannuksista noin 140 000 € koostui eristeistä. Vaihtamalla seinärakennetyyppi voidaan elinkaaren hiilijalanjälkeä pienentää jopa 50 000 kgCO₂e ja elinkaarikustannuksia jopa yli 100 000 € (Kuva 27). Kun seinärakenteen U-arvo ja sen vaikutus rakennuksen energiankulutukseen otetaan huomioon, ovat US2 ja US6 parhaat ratkaisut (Kuva 28). Säästö energiankulutuksen hiilijalanjäljessä koko rakennuksen elinkaaren aikana on niin merkittävä, että tuotevaiheessa pienimmän hiilijalanjäljen vaihtoehdot eivät ole parhaita vaihtoehtoja kun energiankulutus otetaan huomioon. Energiankulutuksen kustannus elinkaaren aikana on myös niin suuri, että US2 ja US6 ovat myös edullisempia vaihtoehtoja rakennuksen koko elinkaarta tarkasteltaessa. Pienimmän investointikustannuksen tuotteet eivät ole koko elinkaaren kustannuksia tarkasteltaessa edullisimpia (Kuva 28). Tässä vaiheessa hanketta on vielä hankala määrittää mitkä vaihtoehdoista ovat toteutuskelpoisia, mutta vertailututkimuksen tuloksilla voidaan korostaa energiatehokkuuden merkitystä.

Lattiamateriaalien vertailussa todettiin, että materiaalille asetettava käyttöikä ja yksikkökustannus vaikuttavat tuloksiin merkittävästi. Vertailututkimuksessa käyttöiät ja

kustannukset pyrittiin valitsemaan jokaiselle tuotteelle mahdollisimman tarkasti, mutta tuotteita on markkinoilla niin runsaasti, että on mahdollista löytää korvaavia tuotteita, joiden käyttöiät ja kustannukset ovat tutkimukseen valittuja tuotteita paremmat. Tämä vertailututkimus osoittaa vertailututkimuksen hyödyllisyyden, kun halutaan vertailla tuotteita elinkaarinäkökulmasta. Vinyylilikorkki, laminaatti 1, muovimatto ja laminaatti 2 muodostavat käytännössä yhtä suuren hiilijalanjäljen elinkaarensa aikana, mutta tuotteiden elinkaarikustannukset eroavat suuresti (Kuva 29). Investointikustannuksiltaan edullisin vaihtoehto on myös elinkaarensa aikana edullisin. Toisaalta muovimaton ja laminaatti 3:n investointikustannus on käytännössä sama, mutta laminaatti 3:n elinkaarikustannus on edullisempi. Valittu käyttöikä vaikuttaa suuresti elinkaarikustannuksen suuruuteen; lyhemmällä käyttöiällä materiaali joudutaan vaihtamaan useammin ja elinkaarikustannus kasvaa. Tämä korostaa materiaalien elinkaaren suunnittelun tärkeyttä. Vastaavia vertailututkimuksia on hyödyllistä tehdä, kun vertailuun on valittu mahdollisia toteutettavissa olevia tuotteita.

4.6 Suunnitteluprosessin ohjauksen onnistuminen

Suunnitteluprosessin ohjaus elinkaarilaskennan avulla jäi tämän diplomityön aikana vähäiseksi. Ohjaus keskittyi lähinnä mielikuvien luomiseen ja elinkaariajattelun esittelyyn hankkeeseen osallistuvilla henkilöillä. Elinkaarilaskennalla ei päästy juuri vaikuttamaan suunnittelun ohjaukseen. Diplomityön aikana koko rakennuksen hiilijalanjälki ja elinkaarikustannukset laskettiin kattavasti kerran. Hanke ei diplomityön aikana edennyt niin merkittävästi, että koko rakennuksen laajuista vertailulaskelmaa olisi ollut mielekästä tehdä. Rakennesuunnittelun valmistuttua voitaisiin laskea vertailulaskelma koko rakennukselle, josta muutosta olisi seuraavan kerran järkevää tutkia. Materiaalien vertailututkimukset toimivat pääasiassa konseptin testauksena ja esittelynä. Materiaalivalinnat eivät edenneet vielä niin pitkälle, että olisi voitu tehdä vertailuja todellisten tuotevaihtoehtojen välillä. Vertailututkimuksilla osoitettiin kuitenkin vastaavien vertailujen hyöty tämän ja tulevien hankkeiden tulevaisuudessa. Hanke eteni diplomityön aikana niin vähän, ettei elinkaarilaskennan vaikutuksia ehditty vielä nähdä. Hankkeesta osoitettiin ongelmakohdat ja etsittiin niihin korjauskehotuksia, mutta varsinaisia muutoksia ei hankkeeseen vielä tehty. Korkeiden kerrosten vaikutusta energiankulutukseen tutkittiin ja tulosten perusteella tehtiin päätös suunnittelun

jatkamisesta matalien kerrosten vaihtoehdolla. Tämä oli konkreettisin elinkaarilaskennan avulla tehty suunnitteluprosessin ohjaus diplomityön aikana. Elinkaarilaskenta osoitti, että elinkaaren hiilijalanjälki ja elinkaarikustannukset ovat molemmat melko suuria ja niiden pienentämiseksi täytyy tehdä konkreettisia ja suuria muutoksia. Tämä ohjasi suunnittelua keskittymään yhteisten tilojen pienentämiseen. Yhteisten tilojen ongelmallisuus oli hankkeessa tiedostettu jo aikaisemmin, mutta vasta kustannusarvio johti konkreettisiin toimenpiteisiin.

Tämän diplomityön aikana elinkaarilaskennalla päästiin osallistumaan hieman suunnittelun ohjaukseen, mutta ohjauksen tuloksia ei vielä juurikaan päästy näkemään. Hankesuunnitteluvaiheessa paljon elinkaarilaskentaan tarvittavia tietoja uupuu vielä, koska suunnittelu on kesken. Laskennassa joudutaan siis arvioimaan paljon, mikä aiheuttaa tuloksiin epävarmuutta. Tässä vaiheessa hanketta elinkaarilaskennassa löydettyihin ongelmakohtiin voidaan kuitenkin vielä vaikuttaa. Energiankulutuksen suuruus ja betonin määrä ovat ainoastaan arvioita ja niihin voidaan hankkeen edetessä kiinnittää tarkemmin huomiota, kun niiden vaikutus elinkaaren hiilijalanjälkeen on huomioitu jo nyt. Aikaisemmassa vaiheessa hanketta olisi voitu vaikuttaa päätökseen valita runkomateriaaliksi betoni, mutta laskenta olisi ollut vielä karkeampaa. Nyt materiaalien määrille oli kuitenkin melko hyvä arvio. Hankkeen myöhemmässä vaiheessa materiaalien ja energiankulutuksen määrätiedot tarkentuvat edelleen, jolloin elinkaarilaskennan tulosten luotettavuus kasvaa. Mahdollisuus vaikuttaa käytettäviin materiaaleihin tai rakennusfysikaaliseen suunnitteluun pienenee kuitenkin koko ajan hankkeen edetessä. Myöhemmässä vaiheessa hanketta elinkaariarvioinnilla voidaan laskea rakennuksen elinkaarikustannukset ja hiilijalanjälki, mutta niitä ei voida enää kehittää. Suunnitteluprosessin ohjauksen kannalta elinkaarilaskentaa kannattaa tehdä mahdollisimman usein. Laskemalla useasti hankkeen aikana voidaan seurata hiilijalanjäljen ja kustannusten kehittymistä, sekä ongelmakohtien parantamiseen kehitettyjen ratkaisujen toimivuutta. Yhdellä laskentakerralla joudutaan valitsemaan halutaanko laskennalla parantaa rakennuksen eko- ja kustannustehokkuutta (lasketaan suunnitteluvaiheessa) vai halutaanko laskennalla ainoastaan osoittaa rakennuksen eko- ja kustannustehokkuuden taso (lasketaan valmiista suunnitelmista).

4.7 Jatkotutkimus- ja kehitysehdotukset

PSOAS sr UNO – hanke sisältää ominaisuuksia, jotka aiheuttavat elinkaarilaskentaan epävarmuutta ja joiden vuoksi elinkaarilaskennan tulokset eivät ole hankkeen kannalta edullisia. Rakennus on pistemäinen tornitalo, joka tarkoittaa, että sen pohjapinta-ala on verrattain pieni ja ulkoseinäpinta-alaa on melko paljon. Tämä aiheuttaa energiatehokkuuden kannalta tavallista suuremman merkityksen seinien lämmönläpäisylle. Riittävän energiatehokkuuden saavuttamiseksi seinien eristykseen täytyy kiinnittää erityistä huomiota. Rakennuksen muoto aiheuttaa sille rakenteellisia vaatimuksia. Kerroksissa, joissa rakennuksen pohja kääntyy, täytyy yläkerrosten kuormat siirtää ulkoseinältä laatalle. Ennen rakennesuunnittelun valmistumista on vaikea arvioida minkälaisia betoni- ja teräsmääriä kuormien siirtäminen vaatii ja kuinka lujaa betonia rakenteissa täytyy käyttää. Sama haaste liittyy jokaisessa kerroksessa olevaan suureen parvekkeeseen. Rakennesuunnittelun myötä näissä vaihtokerroksissa ja parvekkeissa betonin ja teräksen aiheuttama hiilijalanjälki voi kasvaa vielä merkittävästi. Rakennuksen julkisivut sisältävät paljon ikkunoita, joka lisää kuormien siirtämisen haasteellisuutta ja voi aiheuttaa tarpeen käyttää tavallista lujempaa betonia, joka kasvattaisi hiilijalanjälkeä. Haastavat rakenteet vaikuttavat myös rakentamisen kustannuksiin, mutta vielä on vaikea sanoa kuinka paljon. Joka tapauksessa se lisää rakennusliikkeen riskin suuruutta ja vähentää hankkeen kiinnostavuutta rakentajan näkökulmasta.

Hankkeen suunnittelussa on pyritty kiinnittämään huomiota myös keinoihin pienentää hiilijalanjälkeä ja kustannuksia. Näitä ei keskeneräisten suunnitelmien vuoksi otettu tässä laskennassa huomioon, mutta niiden suunnittelua kannattaa ehdottomasti jatkaa. Energiankulutuksen pienentämiseksi on suunniteltu lämpöenergian talteenottoa harmaavedestä sekä hissien jarrutusenergian talteenottoa. Elinkaarilaskentaa varten tehdyssä energiankulutuslaskelmassa ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmien hyötysuhteet ja tehokkuuden oletettiin suuriksi. Rakennuksen korkeus aiheuttaa vaatimuksia ilmanvaihtokoneille. Ensimmäisessä suunnitelmassa ilmanvaihtokone sijoitettaisiin ylimpään kerrokseen, jolloin ilmaa täytyy siirtää pitkiä matkoja suurilla runkolinjoilla pitkin. Suunnitellun energiatehokkuuden saavuttamiseksi joudutaan mahdollisesti laatimaan vaihtoehtoisia suunnitelmia, kuten kahden koneen sijoittaminen keskimmäiseen kerrokseen tai huoneistokohtaisten ilmanvaihtokoneiden käyttö.

Näihin kannattaa rakennuksen suunnittelussa kiinnittää erityistä huomiota, koska pienilläkin vuosittaisilla energiankulutuksen säästöillä saadaan rakennuksen elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä pienennettyä merkittävästi. Kevytrakenteisten väliseinien mahdollisuutta kannattaa selvittää suunnittelun edetessä. Kevyet väliseinät lisäävät rakennuksen muokattavuutta ja lisää sen käyttökohteita tulevaisuudessa. Kevyet väliseinät vähentävät betonin määrää ja ovat yksi keino pienentää rakennuksen hiilijalanjälkeä. Valittaessa rakennusmateriaaleja kannattaa mahdollisuuksien mukaan tehdä tässä työssä esiteltyjä rakennevaihtoehtojen vertailuja. Rakennuksen elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen optimoimiseksi täytyy rakennusmateriaaleille tehdä kattava elinkaarisuunnittelu. Pienempi investointikustannus ei aina tarkoita suurempia elinkaarikustannuksia ja tuotevaiheen päästöt eivät kaikkien rakenneosien kohdalla ole merkittävin tekijä elinkaaren aikana. Näitä tietoja voi olla vaikea määrittää ilman kattavaa tutkimusta ja elinkaarisuunnittelua.

Elinkaarisuunnittelussa täytyy materiaalien elinkaaret määrittää mahdollisimman tarkasti, jotta vaihtojen ja korjausten vaikutuksia pystytään arvioimaan mahdollisimman kattavasti. Investointikustannus on rakennuksen elinkaaren suurin tekijä ja sen optimointi on ymmärrettävää, mutta samalla rakennuksen vuosittaiset huoltokustannukset voivat kasvaa. Kattavalla elinkaarisuunnittelulla saadaan optimoitua rakennuksen elinkaarikustannus ja voidaan paremmin ennustaa vuosittaiset huolto- ja ylläpitokustannukset, sekä korjausten aikataulua ja kustannukset. Tilasuunnittelussa on huomioitava yhteisten tilojen ongelmallisuus. Yhteisten tilojen oletetaan kasvattavan asukkaiden yhteisöllisyyttä ja viihtyvyyttä, mutta opiskelija-asunnoissa niiden tuottavuus jää vähäiseksi. Yhteiset tilat kasvattavat rakentamisen kustannuksia, vähentävät vuokratuloja tuottavien tilojen määrää ja kasvattavat huolto- ja ylläpitokustannuksia. Asuntoneliötä kohden laskettaessa myös elinkaarikustannukset ja elinkaaren hiilijalanjälki ovat suurempia, jos yhteisiä tiloja on paljon.

Hankkeen investointikustannuksen suuruuteen vaikuttaa myös markkinatilanne. Rakentamisen lopullinen hinta määräytyy rakentamishetken markkinoiden mukaan. Rakennusliikkeen kate määräytyy hankkeen riskien ja rakennusliikkeen tilauskannan mukaan. Yksilöllisten ratkaisujen hinnoittelu on hankalaa ja hyvässä markkinatilanteessa rakennusliikkeen ei kannata tehdä riskialttiille kohteelle tarjousta. Jos tarjolla on pienemmän riskin kohteita, voidaan haastavia kohteita välttää.

Viemällä hankkeen suunnittelua pidemmälle ennen tarjousten kysymistä voidaan vähentää hankkeeseen liittyvää riskiä ja pienentää rakennusliikkeen tarjoukseensa laskemaa katetta. Jos tarjouskyselyvaiheessa hankkeeseen liittyy paljon epävarmoja asioita ja haastavalta vaikuttavia ratkaisuja, täytyy rakennusliikkeen ottaa hankkeeseen lähtiessään riski, joka näkyy suoraan rakentamisen kustannuksessa rakennusliikkeen katteessa.

Keinoja UNO – hankkeen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentämiseksi:

- Energiatehokkuus. Mahdollisuus suuriin säästöihin yksinkertaisilla keinoilla.
 - o Seinien ja ikkunoiden U-arvot
 - o Lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien tehokkuus
 - o Energian kierrätys- ja talteenottojärjestelmät
 - o Käytettävän energian tuottamisesta syntyvät päästöt
- Betonin määrän ja laadun optimointi
 - o Tutkitaan mahdollisuus kevyille väliseinille
 - o Tutkitaan mahdollisuus käyttää kierrätettyä betonia
- Materiaalien elinkaarisuunnittelu
 - o Valitaan materiaalit perustellusti
 - o Otetaan kustannusten lisäksi myös hiilijalanjälki huomioon valinnoissa

Keinoja UNO – hankkeen investointikustannusten pienentämiseksi:

- Haastavien rakenteiden perusteellisempi suunnittelu tai poistaminen
- Yhteisten tilojen vähentäminen laskee kustannuksia asuntoneliötä kohti
- Kattavampi suunnittelu ennen kilpailutusta
- Rakentamisesta syntyvän kustannuksen pienentäminen, rakennusliikkeen riski kasvattaa kustannusta
- Valitaan materiaalit perustellusti

Keinoja UNO – hankkeen elinkaarikustannusten pienentämiseksi:

- Investointikustannuksen optimointi
 - Otetaan kuitenkin elinkaarikustannukset huomioon
- Energiatehokkuus
 - Samat keinot kuin hiilijalanjälki - kohdassa
 - Pienentää vuosittaisia kustannuksia, elinkaari 100 vuotta
- Materiaalien elinkaarisuunnittelu
 - Huolto- ja ylläpitokustannusten optimointi
 - Korjauskustannusten optimointi

Keinoja eko- ja kustannustehokkuuteen PSOAS sr:n tulevaisuuden hankkeisiin:

- Hankkeen selkeämpi määrittely tarveselvitysvaiheessa
 - Tilantarpeen määrittely
 - Käyttötarkoituksen määrittely
 - Yhteistyökumppaneiden vaatimukset
 - Tietomallivaatimus
 - Rakennesuunnittelu mukaan varhaisemmassa vaiheessa
- Kilpailutuksen suunnittelu
 - Selkeä vastuualueiden määrittely: PSOAS ja kumppanit
 - Rakennuksen suunnittelu pidemmälle ennen kilpailutusta
- Ensimmäiset tarjoukset työryhmiltä, joissa jo rakenne- ja LVIS – suunnittelu mukana
 - Hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten laskenta jo tarjouksista
 - Runkomateriaalin valinta laskennan perusteella
- Elinkaariajattelu mukaan hankkeeseen jo alussa
 - Rakenne- ja materiaalivaihtoehtojen vertailulaskelmia
 - Elinkaarinäkökulmasta perusteltuja päätöksiä
 - Elinkaarilaskenta hankkeen edetessä mahdollistaa kehityksen seurannan
- Hankkeeseen työryhmä, joilla selkeät tehtävät
 - Asiantuntijat avuksi rakennuksen suunnitteluun

Elinkaariarvioinnille on olemassa useita eri menetelmiä, laskentatapoja ja sertifiointijärjestelmiä. Alalla on eri näkemyksiä laskennan hyödyllisyydestä, tulosten todenmukaisuudesta ja laskentamenetelmien eroavaisuuksista. Laajan kirjon ja erimielisyyksien vuoksi laskentaa tekevien on tärkeää dokumentoida tarkasti ja läpinäkyvästi laskennan tiedot. Laskentatuloksia on haastavaa verrata, jos ei tiedetä mitä on laskettu ja miten. Laskentaan sisällytettävien tietojen määrä riippuu käytettävästä menetelmästä ja laskentaan sisällytetyt ja siitä pois rajatut tiedot täytyy dokumentoida. Asioita ei saa jättää huomiotta tulosten optimoimiseksi tai tietojen piilottamiseksi. Elinkaariarvioinnin kasvavan suosion ja ympäristövaikutusten pienentämisen kiireellisyyden vuoksi laskentamenetelmiä ja arviointijärjestelmiä on kehitetty useita ja uusia kehitetään jatkuvasti. Tämä voi aiheuttaa hämmennystä sekä rakennusta rakentavalle taholle, että sitä ostavalle kuluttajalle. Jos rakennuksen ympäristöystävällisyys halutaan osoittaa, rakennusta suunniteltaessa täytyy tehdä valinta rakennukselle haettavasta ympäristöluokituksesta. Euroopassa EN 15978 – standardi on yhtenäistänyt laskentaa ja yleisimpien menetelmien laskenta perustuu standardissa esiteltyyn laskentatapaan ja CML - IA 2012 – karakterisointikertoimiin. Ilmaston lämpeneminen eli elinkaaren hiilijalanjälki on yleisin vaikutusluokka, mutta kattavammissa luokitusjärjestelmissä ja tutkimuksissa on otettu huomioon useampia vaikutusluokkia. Suomessa ympäristöministeriö julkaisi marraskuussa 2018 rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmän.

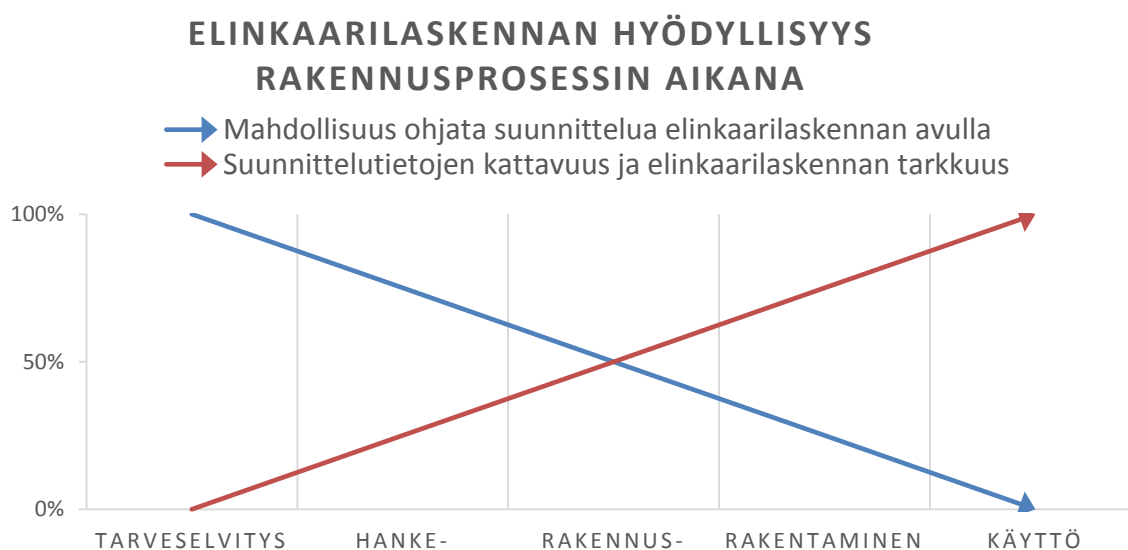
Ympäristöministeriön arviointimenetelmän laskenta perustuu EN 15978 – standardiin. Menetelmässä ei määritellä missä vaiheessa hanketta laskenta täytyy tehdä. Se sisältää kuitenkin menetelmän yksinkertaistetulle ja tarkennetulle arvioinnille. Yksinkertainen arviointi on tarkoitettu tehtäväksi rakennuksen luonnosvaiheessa tai rakennuslupaa haattaessa. Tarkennettu arviointi voidaan tehdä rakennushankkeen tietojen tarkentuessa ja sen avulla voidaan tuoda esiin ilmastomyönteisten ratkaisujen vaikutukset. Mielestäni on hyvä, että menetelmä mahdollistaa laskennan tekemisen hankkeen eri vaiheissa. Eri menetelmillä eri vaiheissa tehdyn laskennan vertailukelpoisuus voi kuitenkin olla kyseenalaista. Kun myöhemmässä laskennassa sisällytetään laskentaan enemmän asioita, tulos lienee jo siitä syystä alkuvaiheessa laskettua suurempi ja laskentojen välissä tehtyjen ympäristöystävällisten valintojen vaikutus voi olla vaikea nähdä tuloksista. Menetelmässä ei määritellä sidotaanko raja-arvot hankkeen eri vaiheessa tehtyihin laskelmiin ja täytyykö laskenta tehdä hankkeen aikana useammin kuin kerran.

Menetelmän mukaisessa laskennassa rakennuksen elinkaarena voidaan käyttää joko 50 vuotta tai rakennuksen tavoiteikäkkää. Jokaiselle hankkeelle voidaan siis laskenta tehdä joustavasti käyttäen hankkeelle suunniteltua elinkaarta. Tällä mahdollistetaan hankkeen elinkaaren kattava suunnittelu, mutta jos jokainen hanke lasketaan eripituisella elinkaarella, hankkeiden vertailu muuttuu haastavaksi. Pidemmällä elinkaarella laskettaessa rakentamisen hiilijalanjäljen merkitys pienenee ja käytön aikaisen energiankulutuksen merkitys korostuu. Kun tulokset esitellään jaettuna neliölle vuodessa ($\text{kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$), voidaan eri elinkaarilla laskettuja tuloksia vertailla. Vertailussa pidemmän elinkaaren rakennus näyttää kuitenkin paremmalta, koska käytön aikaiset vaikutukset ovat vuosittain lähes samat, mutta rakentamisen vaikutukset jakautuvat useammalle vuodelle. Menetelmässä laskennan raja-alue sisällyttää rakennuksen rungon, täydentävät rakenteet ja talotekniikan keskeiset osat. Perustuksia ei huomioida raja-alueissa. Laskentaan sisällytettävien rakennusosien raja-alue on menetelmässä vielä keskeneräinen, mutta ilmeisesti määrittelyssä on tarkoitus käyttää Talo2000 –nimikkeistöä. Hankkeiden vertailun kannalta on tärkeää, että sisällytettävät rakenteet on rajattu selkeästi ja Talo2000 –nimikkeistön käyttäminen lisää yhteensopivuutta investointikustannuslaskennan kanssa. Tulevaisuudessa menetelmää voisi kehittää niin, että rakennusosa-arvion laskenta Talo2000 –nimikkeistön avulla yhdistettäisiin rakennusosien hiilijalanjäljen laskennan kanssa. Tässä työssä todettiin talotekniikan suuri merkitys rakennusvaiheen hiilijalanjäljessä, joten sen sisällyttäminen laskentaan on viisasta.

Menetelmässä ei käytetä energian päästökertoimina samoja kertoimia koko elinkaaren ajalle, vaan energian tuottamisesta syntyvien päästöjen oletetaan vähentyvän tulevaisuudessa. Tässä työssä energianpäästökertoimina käytettiin samoja arvoja koko elinkaarelle: sähkö $0,22 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$ ja kaukolämpö $0,22 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$. Päästökertoimina käytettiin alueellisia keskiarvoja, eikä rakennuksessa oletettu käytettävän vihreää energiaa. Laskennan standardisoimiseksi on energian päästöjen arviointi keskiarvojen avulla yleistynyt. Jos jokainen laskentaa tekevä arvioi hankkeessa käytettävän energian ympäristöystävällisyyden ja tulevaisuuden kehityksen itse, eivät laskelmat ole keskenään lainkaan vertailukelpoisia. Rakennuksen yhteydessä olevien energiantuottojärjestelmien, kuten aurinkopaneelien, vaikutukset on laskennassa otettu yleensä huomioon vähentämällä tuotettu energia määrä ostoenergian tarpeesta, mutta ostoenergian tuottotapaa ei yleensä ole valittu.

On ilmeistä, että tulevaisuudessa energian tuottamisesta syntyvien päästöjen täytyy vähentyä, mutta alalla ei ole yhteisymmärrystä tavasta, jolla päästöjen muutosta tulisi mallintaa. Ympäristöministeriön menetelmä esittelee yhden mallinnustavan. Siinä energian tuottamisesta syntyviä päästöjä mallinnetaan päätettyjen politiikkatoimien mukaisesti ja energian päästökertoimet pienenevät vuosittain. Laskennan lopputuloksiin tämä vaikuttaa siten, että käyttövaiheen vaikutukset pienenevät ja rakentamisvaiheen päästöt korostuvat. Tällä menetelmällä voidaan energiankulutuksen osalta saada todennukaisempia tuloksia ja energiankulutuksen merkityksen pienentyessä rakennushankkeessa tullaan varmasti kiinnittämään tarkemmin huomiota rakentamisvaiheeseen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Tärkeintä energian päästökertoimien mallintamisessa on kuitenkin yhtenäinen menetelmä vertailukelpoisuuden varmistamiseksi.

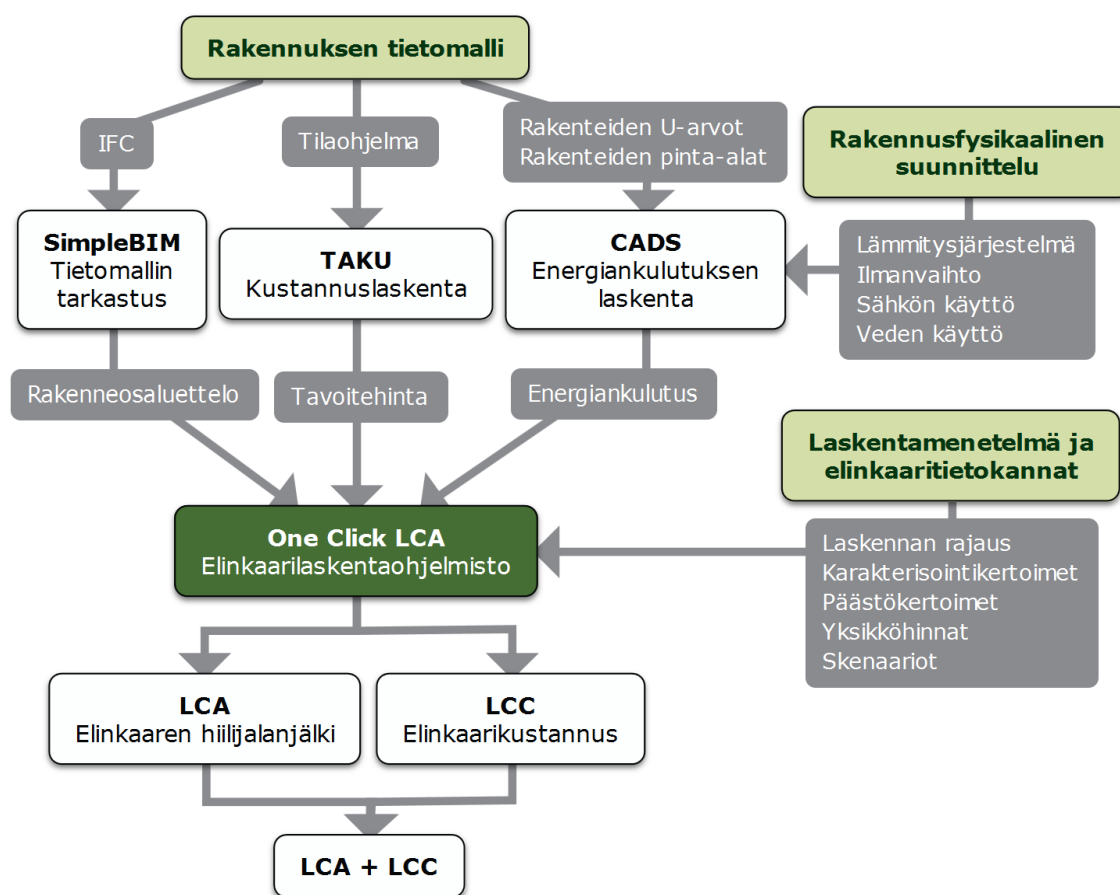
Ympäristöministeriön menetelmä ei määrittele kuinka monta kertaa hankkeen aikana elinkaarilaskentaa täytyy tehdä ja missä vaiheissa hanketta. Tässä työssä laskentaa tehtiin ainoastaan hankesuunnitteluvaiheessa, mutta suunnitteluprosessin ohjaukseen osallistuessa pohdittiin laskennan hyödyllisyyttä muissakin hankkeen vaiheissa. Yhteenvedona voidaan todeta, että elinkaarilaskentaan ja suunnittelun ohjaukseen liittyy dilemma: hankkeen edetessä elinkaarilaskennan tarkkuus kasvaa, mutta mahdollisuus vaikuttaa suunnitteluun vähenee (Kuva 30). Tarveselvitysvaiheessa elinkaarilaskennassa vaadittavista tiedoista on saatavilla vain hyvin pieni osa ja laajemmassa laskennassa joudutaan tekemään suuria oletuksia.



Kuva 30. Elinkaarilaskennan hyödyntäminen rakennusprosessissa.

Kun rakennuksen suuruusluokka on tiedossa, voidaan laskelmia tehdä esimerkiksi rakennuksen rungolle runkomateriaalin valintaa varten. Joissakin hankkeissa elinkaaren hiilijalanjälki on laskettu jo ensimmäisen tarjouskilpailun luonnossuunnitelmista. Tällä tavalla varmistetaan, että elinkaarilaskenta on suunnittelua ohjaava tekijä alusta asti. Hiilijalanjäljen laskeminen tilaohjelman perusteella ei tällä hetkellä ole mahdollista, mutta se voisi olla yksi keino yhtenäistää ja tarkentaa varhaisen suunnitteluasteen hiilijalanjälkilaskelmia. Hankesuunnitteluvaiheessa käytettävissä on huomattavasti kattavammat tiedot ja laskennan tulosten perusteella voidaan tehdä kattavampia johtopäätöksiä rakennuksen ympäristöystävällisyydestä ja kustannustehokkuudesta. Tässä vaiheessa hanketta elinkaarilaskennassa havaittuihin ongelmakohtiin voidaan vielä vaikuttaa. Rakennussuunnitteluvaiheessa tehdään päätökset käytettävistä materiaaleista ja suunnitteluratkaisuista. Päätöksenteon tueksi voidaan tehdä elinkaarisuunnittelua ja vertailulaskelmia vaihtoehtojen välille. Valmiiden suunnitelmien avulla saadaan kaikkein tarkimmat arviot hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten suuruudesta, mutta tässä vaiheessa on vaikea enää vaikuttaa niiden kehittämiseen. Toteutuneista materiaalien ja energiankulutuksen määristä tehdyllä elinkaarilaskennalla voidaan arvioida suunnitteluvaiheessa tehtyjen arviointien tarkkuutta ja tehtyjen korjausten vaikutuksia. Hankkeen eri vaiheissa tehtyjä laskelmia vertaillen täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että usein hankkeen edetessä elinkaarilaskentaan sisällytettävien asioiden määrä kasvaa, joka kasvattaa elinkaaren hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten suuruutta.

Tässä työssä tutkittiin tietomallin hyödyllisyyttä elinkaaren hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten laskennassa. Työn aikana tehtiin samoja havaintoja, joita diplomityön taustatutkimuksessa löydetyissä tutkimuksissa tuotiin esille: tietomallin avulla elinkaarilaskenta on tehokkaampaa, mutta prosessissa on vielä paljon potentiaalia tehostamiselle. Tässä työssä laskettiin rakennuksen energiankulutus, tavoitehinta, rakenneosien hiilijalanjälki ja elinkaarikustannukset sekä rakennuksen käytön aikana syntyvät kustannukset ja hiilijalanjälki. Tietomallia käytettiin kaikessa laskennassa lähtötietojen lähteenä, mutta ainoastaan rakenneosien hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten laskennassa käytettiin hyväksi tietomallipohjaisen tiedon siirtämistä IFC – muodossa (Kuva 31). Rakenneosien määrät ja materiaalit tuotiin elinkaarilaskentaohjelmistoon IFC – muodossa käyttämällä SimpleBIM – ohjelmistoa. Elinkaarilaskentaohjelmisto ei tukenut IFC – mallin syöttämistä suoraan ohjelmistoon, joten malli täytyi viedä toisen ohjelmiston kautta.



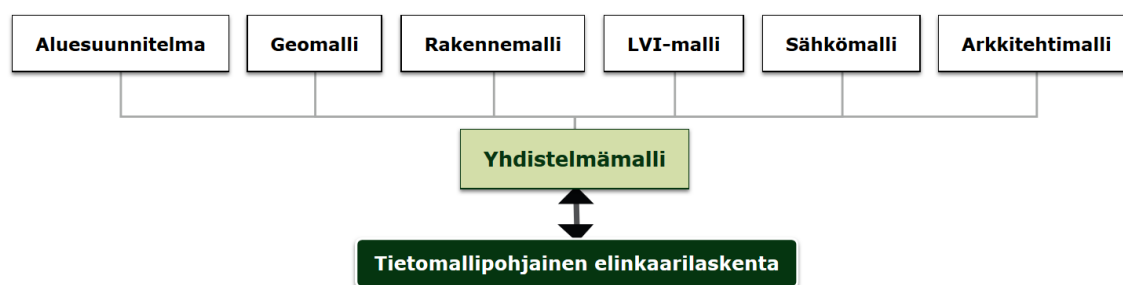
Kuva 31. Tietomallipohjainen elinkaarilaskentaprosessi hankesuunnitteluvaiheessa.

Tavoitehinnan laskemista varten tietomallista muodostettujen piirustusten perusteella muodostettiin tilaohjelma, joka vietiin TAKU – ohjelmistoon. Mallintamalla tilat tietomalliin tilaobjekteina, voi tilaohjelman tulostaa tietomalliohjelmistosta valmiiksi, eikä sitä tarvitse koota käsin piirustusten avulla. Tietomalli ei sisältänyt tilaobjekteja, joten työssä ei selvitetty mahdollisuutta viedä tilaohjelma TAKU – ohjelmistoon IFC – mallin avulla. Energiankulutuksen laskentaa varten rakennuksen vaipan tiedot vietiin CADS – ohjelmistoon. Vienti IFC – mallin avulla ei onnistunut, joten tiedot syötettiin käsin. Ohjelmisto tukee mallintamista ja energiankulutuksen voi laskea tietomallin avulla, mutta käytössä ollut tietomalli ei ollut yhteensopiva käytetyn CADS – version kanssa. Energiankulutuksen laskentaa varten ohjelmistoon täytyi viedä myös tietoja, joita tietomalli ei sisällä, kuten tiedot rakennuksen lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmistä. Elinkaarilaskentaohjelmistoon vietiin rakenneosaluettelo SimpleBIM:stä, tavoitehinta TAKU:sta ja energiankulutus CADS:stä. Elinkaarilaskentaohjelmisto sisältää elinkaarilaskentaan liittyviä tietoja, joita tietomallissa ei ole, kuten käytettävä laskentamenetelmä, tuotteiden ja prosessien päästökertoimet ja yksikkökustannukset.

Elinkaarilaskentaohjelmistolla laskettiin elinkaaren hiilijalanjälki ja elinkaarikustannukset. Laskenta täytyy ohjelmistossa tehdä molemmille erikseen, mutta muista ohjelmistoista tuotuja tietoja voidaan kätevästi käyttää molemmissa laskennoissa. Tässä työssä hiilijalanjäljen ja elinkaarikusten tulokset haluttiin yhdistää, mutta elinkaarilaskentaohjelmisto ei antanut siihen mahdollisuutta, joten laskentatulokset tuotiin ohjelmasta ulos. Elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen vertailukuvat muodostettiin Excel – ohjelmistossa.

Ilman tietomallia rakennusosat olisi täytynyt syöttää elinkaariohjelmistoon käsin ja suunnitelmien muuttuessa se olisi pidemmällä aikajänteellä todella työlästä. Diplomityön aikana hankkeen suunnitelmissa korkeat kerrokset päätettiin vaihtaa mataliin. Arkkitehti teki muutokset tietomalliin, jonka jälkeen elinkaarilaskenta suoritettiin uudestaan. Tietomallin avulla rakenneosien muuttuneet määrät saatiin kätevästi vietyä elinkaarilaskentaohjelmistoon. Tilojen määrän muuttumisen vuoksi tilaohjelma täytyi muodostaa uudestaan ja tavoitehinta laskea uudestaan. Tilavuuksien ja kerrosmäärän muuttumisen vuoksi myös energiankulutus täytyi laskea uudestaan. Tietomallin tietoja täytyi jakaa kolmeen eri ohjelmistoon laskennan suorittamiseksi. Rakennusprosessin aikana suunnitelmat muuttuvat jatkuvasti, jolloin uusia vertailulaskelmia on tarve tehdä useita. Elinkaarilaskentaprosessin tehostamiseksi tiedonsiirron jouhevuutta tietomallista elinkaarilaskentaohjelmistoon täytyy kehittää. Tietomallia on mahdollista hyödyntää elinkaarilaskennassa vieläkin paremmin. Laskentaprosessi kaipaa ohjelmistoa, joka korvaa SimpleBIM, TAKU ja CADs – välivaiheen kokonaan ja mahdollistaa rakenneosaluettelon, tavoitehinnan ja energiankulutuksen viemisen tietomallista suoraan elinkaarilaskentaan. Toinen vaihtoehto on sisällyttää näiden laskeminen elinkaarilaskentaohjelmistoon. Etenkin energiankulutukseen vaikuttavien rakenneosien muutosten vaikutukset kokonaisuuteen on tällä hetkellä liian työlästä laskea. Elinkaarilaskentaprosessi täytyy saada niin nopeaksi, että pienistäkin muutoksista kannattaa laskea vaikutukset. Tässä työssä investointikustannusten arviointiin käytettiin tilaohjelmaperusteista tavoitehintamenetelmää. Hankkeesta oli kuitenkin jo olemassa tietomalli, jonka sisältämiä tietoja rakennusosien määristä käytettiin elinkaaren hiilijalanjäljen laskennassa. Koska rakennusosien määrätieto oli jo olemassa, olisi ollut perusteltua laskea kustannusarvio rakennusosa – arviomenetelmällä. Rakennusosa – arviomenetelmällä laskettu kustannusarvio on tavoitehintamenetelmää tarkempi.

Tietomallin käyttäminen elinkaarilaskennassa asettaa vaatimuksia myös tietomallille. Tämä on hyvä huomioida jo rakennusprosessin alkuvaiheessa ja asettaa tietomallivaatimukset jo hankkeen alussa. Rakenneosaluettelon viemiseksi elinkaarilaskentaohjelmistoon täytyy tietomallin kaikkien osien sisältää ainakin seuraavat tiedot: luokka, materiaali ja tilavuus (vaihtoehtoisesti pinta-ala ja paksuus). Tilaohjelman viemistä varten täytyy tilat mallintaa tilaobjekteina. Rakennuksen suunnitteluprosessin aikana rakennukselle voidaan muodostaa useita tietomalleja, jotka sisältävät eri tietoja. Esimerkiksi arkkitehtisuunnittelusta voidaan muodosta yksi ja rakennesuunnittelusta toinen malli. Elinkaarilaskennan kannalta on tärkeää pitää hankkeessa yllä yhdistelmämallia, joka sisältää kaikkien suunnitteluhaarojen viimeisimmät tiedot (Kuva 32). Näin tietomallin hyödyt ajansäästössä ja laskennan tarkkuudessa saadaan elinkaarilaskennassa parhaiten hyödynnettyä.



Kuva 32. Tietomallipohjainen elinkaarilaskenta.

Tulevan lainsäädännön myötä elinkaarilaskenta osana rakennusprosessia tulee varmasti lisääntymään. Jatkossa on syytä tutkia rakentamisen hiilijalanjäljen pienentämisen vastuualueita rakennusprosessissa. Hiilijalanjäljen syntymiseen voidaan vaikuttaa suunnitteluvaiheessa, rakentamisvaiheessa, käyttövaiheessa ja käytön jälkeen. Suunnitteluvaiheessa vaikutus tehdään elinkaarilaskennalla ja sen avulla tehdyillä päätöksillä. Suunnitteluvaiheessa tehdään lähes kaikki päätökset ja valinnat, joilla on vaikutuksia hiilijalanjäljen syntyyn. Materiaalivalinnoilla vaikutetaan rakentamisvaiheen hiilijalanjäljen suuruuteen. Valitsemalla ympäristöystävällisiä materiaaleja hiilijalanjälkeä voidaan pienentää, mutta erikoismateriaalit ovat usein tavallista kalliimpia. Valitsemalla tuotteita, joille on olemassa ympäristöseloste (EPD) ohjataan tuotevalmistajia kiinnittämään huomiota tuotteidensa ympäristöystävällisyyteen. Suunnitteluvaiheen laskennassa arvioidaan rakentamisesta syntyviä päästöjä, mutta

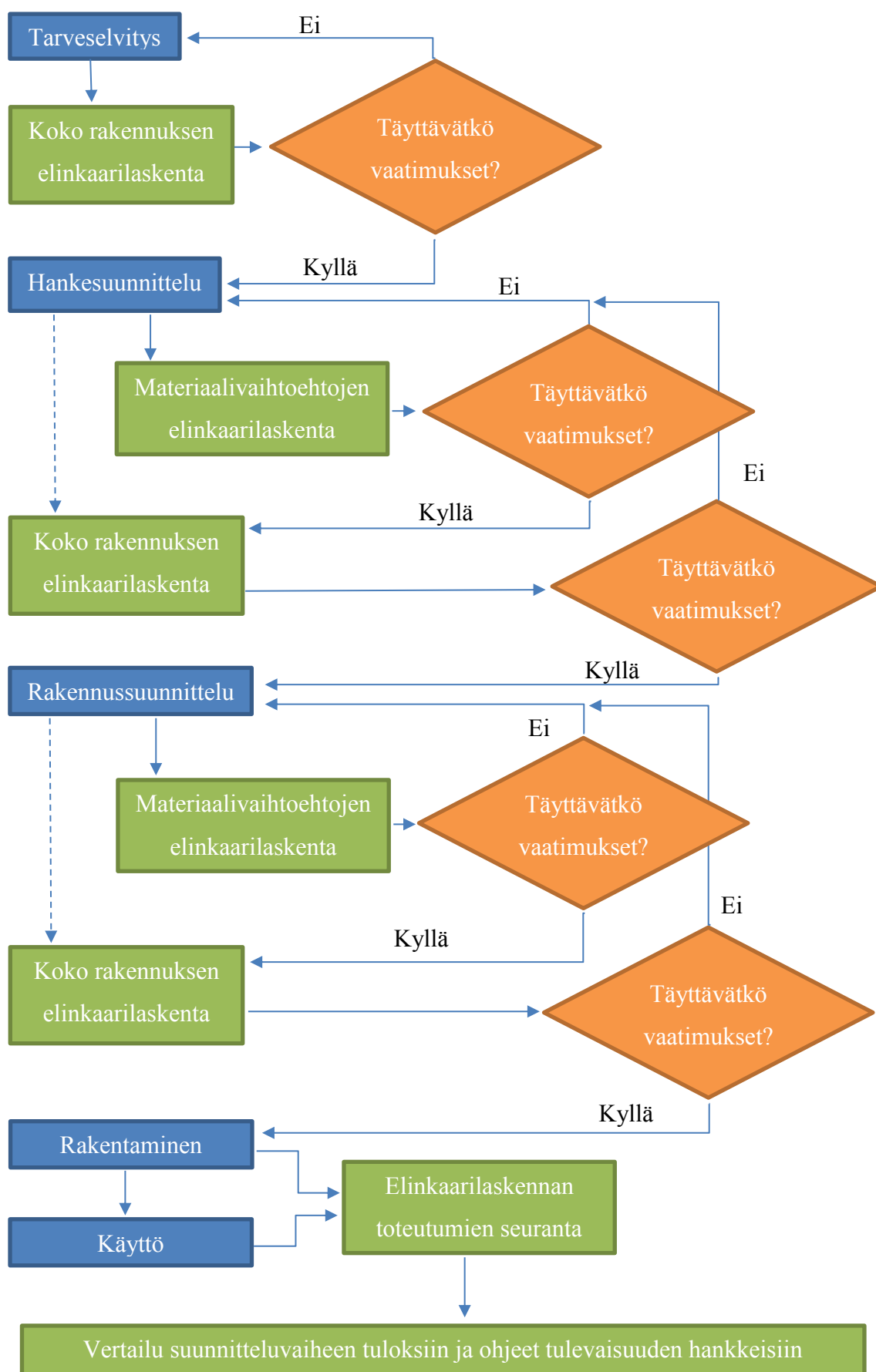
voidaanko suunnittelulla ohjata rakentamisessa syntyvien päästöjen suuruutta? Valitsemalla lähellä rakennustyömaata tuotettuja materiaaleja pienennetään materiaalien kuljetuksesta syntyviä päästöjä. Voidaanko suunnitteluvaiheessa muodostaa työmaalle ohjeita rakennusjätteen kierrätykselle tai työmaalla käytettävän energian tuottamiselle? Suunnitteluvaiheessa hiilijalanjäljen pienentämisessä suurimmassa roolissa on elinkaarisuunnittelu ja – laskenta, mutta kenen vastuulla laskenta on?

Vastuun jakautuminen on sidoksissa rakennushankkeessa käytettävään urakkamuotoon. Tilaaja voi sisällyttää elinkaarilaskennan kokonaisvastuu-urakkaan, jolloin laskenta ei vaadi tilaajalta lainkaan resursseja. Tekemällä elinkaarilaskennan itse, pystyy tilaaja parhaiten vaikuttamaan hankkeen ympäristöystävällisyyteen ja tekemään elinkaarilaskentaa haluamansa määrän. Tämä vaatii kuitenkin laskentatietojen siirtämistä urakoitsijan ja tilaajan välillä sekä asiantuntijan, laskentaohjelmiston ja elinkaaritietokantojen hankkimista tilaajaorganisaatioon. Asettamalla kokonaisvastuu-urakkaan tavoitteita elinkaarilaskennalle, voi tilaaja ohjata hanketta haluamaansa suuntaan osallistumatta itse laskentaan. Jos hanke toteutetaan kokonais- tai projektinjohtourakkana, tilaajan on helpompi osallistua suunnittelun ohjaukseen ja elinkaarilaskennan tekeminen tilaajan toimesta on resurssien riittäessä viisasta. Elinkaarisuunnittelu voidaan myös liittää suunnittelu-urakkaan, jos kaikki suunnittelu tilataan yhdeltä toimittajalta. Tällöin kaikki elinkaarisuunnitteluun tarvittava tieto on suunnittelu-urakan toimittajan hallussa, eikä tietoja tarvitse siirtää organisaatioiden välillä. Rakennussuunnitteluvaiheessa täytyy hankkeeseen tehdä rakenne-, LVIS-, arkkitehti-, ympäristö-, ja geotekninen suunnittelu. Elinkaarisuunnittelu voidaan tehdä yhtenä osana rakennussuunnittelua (Kuva 33), jolloin muiden suunnittelualojen ohjaus on vaikeampaa.



Kuva 33. Elinkaarisuunnittelu rakennusprosessissa rakennussuunnittelun osana.

Elinkaarisuunnittelun tekeminen vaatii tietoja kaikista muista suunnittelun haaroista ja sen tuloksilla voidaan ohjata muiden suunnitteluhaarojen jatkokehitystä. Elinkaarilaskennan hyödyt suunnittelun ohjauksessa ja rakennuksen elinkaarisuunnittelussa saadaan parhaiten käyttöön, jos se irrotetaan muusta suunnittelusta ja sitä tehdään useasti suunnittelun aikana (Kuva 34). Elinkaarisuunnittelua tulisi tehdä koko rakennuksen laajuudella elinkaarilaskennalla tarveselvitys-, hankesuunnittelu- ja rakennussuunnitteluvaiheissa. Suunnittelun edetessä elinkaarilaskennan laajuuden tulisi kasvaa karkeasta arvioinnista tilaohjelman pohjaiseen ja edelleen rakennusosapohjaiseen arviointiin. Elinkaarisuunnittelua tulisi käyttää suunnittelua ohjaavana työkaluna. Ohjaus edellyttää laskentatulosten vertailua asetettuihin vertailukriteereihin, aikaisempiin suunnitteluratkaisuihin ja vertailukohteisiin. Hankkeelle voidaan asettaa raja-arvoja, jotka elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen täytyy alittaa, jotta suunnittelua voidaan jatkaa seuraavaan vaiheeseen. Vertailukriteereiden ja raja-arvojen tason määrittäminen vaatii jatkotutkimuksia. Lisäksi hankesuunnittelu- ja rakennussuunnitteluvaiheissa voidaan tehdä materiaalivaihtoehtojen vertailulaskelmia suunnittelun ohjauksen tueksi. Rakentamis- ja käyttövaiheissa tulisi seurata ja tallentaa toteutumia, jotta voidaan verrata suunnitteluvaiheessa tehdyn elinkaarilaskennan tuloksia toteutuneisiin hiilijalanjälkeen ja elinkaarikustannuksiin. Näiden tietojen avulla voidaan arvioida elinkaarilaskennan luotettavuutta ja ohjata tulevia rakennushankkeita.



Kuva 34. Elinkaarisuunnittelu rakennusprosessissa ohjaavana suunnittelutyökaluna.

Suunnitteluprosessi vaatii suunnitteluhaarojen välistä kommunikointia, suunnitelmien yhdistelyä ja törmäystarkasteluja ilman elinkaarisuunnitteluakin. Kaikkea muuta suunnittelua voidaan kuitenkin tehdä itsenäisesti hankesuunnittelussa määritettyjen tietojen pohjalta. Elinkaarisuunnittelu on täysin riippuvainen muista suunnitteluvaiheista saatavista lähtötiedoista. Suuressa rakennushankkeessa on useita johtamisen tasoja, vastuun tasoja, suunnittelun tasoja ja suunnittelualoja, jotka vaihtelevat riippuen käytettävästä urakkamuodosta. Jatkossa on syytä tehdä kattavampi tutkimus elinkaarilaskennan sovittamisesta eri urakkamuotoihin. Tutkimuksessa täytyy tutkia vastuiden ja johtamissuhteiden vaikutuksia mahdollisuuteen ohjata suunnittelua elinkaarilaskennan avulla. Tilaajan, suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden väliset johtamissuhteet riippuvat urakkamuodosta, joten valittu urakkamuoto määrää myös kenen elinkaarisuunnittelua kannattaa rakennusprosessissa tehdä elinkaarilaskennan käyttämiseksi suunnittelun ohjauksessa. On myös syytä tutkia ohjauksen vaikutuksia hankkeen suunnittelukustannuksiin. Jos elinkaarisuunnittelun avulla tehdään useita muutoksia, joiden vuoksi esimerkiksi rakenne- tai LVIS – suunnittelu täytyy tehdä uudestaan, voivat suunnittelun kustannukset kasvaa merkittävästi.

Elinkaarilaskenta lisää hankkeen kustannuksia, joten hankkeeseen osallistuvien tahojen täytyy päättää kuinka monta laskentaa hankkeen aikana tehdään. Pyritäänkö elinkaarilaskennalla ainoastaan toteamaan rakennuksen taso vai käytetäänkö sitä aktiivisena keinona kehittää eko- ja kustannustehokkuutta? Tehdäänkö hankkeen aikana tuotteiden vertailulaskelmia rakennuksen elinkaaren kannalta parhaiden vaihtoehtojen löytämiseksi?

Rakentamisvaiheessa hiilijalanjäljen vähentämiseen voidaan vaikuttaa tehokkaalla materiaalien käyttämisellä, rakennusjätteen kierrättämisellä ja energiatehokkuudella. Hiilijalanjäljen tehokas pienentäminen vaatii kaikkien osapuolten oma-aloitteista osallistumista tai valvontaa. Käyttövaiheessa tehokkain keino pienentää hiilijalanjälkeä on energiatehokkuus. Käyttäjillä on tässä suuri rooli ja rakennuksen suunnittelussa täytyy pohtia keinoja käyttäjien toiminnan ohjaukseen energiatehokkaampaan suuntaan esimerkiksi veden käytön säätelyllä tai jätteiden kierrätyksen helpottamisella. Käyttäjien toiminta vaikuttaa myös huollosta, ylläpidosta ja korjauksista muodostuvaan hiilijalanjälkeen ja elinkaarisuunnittelun toteutumiseen.

Käyttövaiheessa on tärkeää seurata ja dokumentoida toteutunut hiilijalanjälki, jotta sitä voidaan verrata suunnitteluvaiheessa arvioituun ja tehdä johtopäätöksiä tulevaisuuden hankkeita varten. Käytön jälkeen syntyvään hiilijalanjälkeen vaikuttaa materiaalien loppusijoitus ja purkamisesta ja kuljetuksista syntyvät päästöt. Materiaalien loppusijoitukseen voidaan vaikuttaa elinkaarisuunnittelulla. Purkamisesta ja kuljetuksesta syntyviä päästöjä voidaan arvioida, mutta voidaanko hankkeen suunnitteluvaiheessa määritellä, että rakennuksen purkamistapa ja siihen käytettävien laitteiden tulee olla ympäristöystävällisiä?

Rakentamisen hiilijalanjäljen pienentämisen kannalta tärkein vaihe on rakennuksen suunnittelu. Suunnitteluvaiheessa tehdään hiilijalanjäljen kannalta suurimmat päätökset. Suurimmat säästöt elinkaarikustannuksissa ja hiilijalanjäljessä saadaan energiatehokkuudella, materiaalien elinkaarisuunnittelulla ja tekemällä rakenneosavaihtoehtoille vertailulaskelmia. Suunnittelun kustannukset rakennushankkeessa tulevat tulevaisuudessa kasvamaan tietomallintamisen lisääntymisen ja suunnittelun määrän kasvamisen myötä. Elinkaarilaskenta tulee osaltaan kasvattamaan suunnittelun kustannuksia, lisääntyvän suunnittelun tarpeen vuoksi. Elinkaarilaskennan vuoksi rakennushankkeessa tarvittavien konsulttien määrä tulee tulevaisuudessa kasvamaan. Elinkaarilaskenta tulee jatkossa olemaan osa rakennusprosessia. Lähitulevaisuudessa elinkaarilaskennan rooli rakennushankkeen suunnittelunohjauksessa kasvaa; laskennan määrä ja vastualueet täytyy suunnitella hankekohtaisesti kunnes menetelmä vakiintuu.

LÄHDELUETTELO

Abd Rashid, A. F. ja Yusoff, S. (2015) ”A review of life cycle assessment method for building industry”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 45, ss. 244–248. doi: 10.1016/j.rser.2015.01.043.

Anand, C. K. ja Amor, B. (2017) ”Recent developments , future challenges and new research directions in LCA of buildings : A critical review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 67, ss. 408–416. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.058.

Angeria, H. (2018) ”Haastattelu 23.10.2018”. Oulu.

Antikainen, R. (2010) *Elinkaarimetodiikkojen nykytila , hyvät käytännöt ja kehitystarpeet*. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/39822>.

Asdrubali, F. (2009) ”The role of Life Cycle Assessment (LCA) in the design of sustainable buildings: Thermal and sound insulating materials”, *8th European Conference on Noise Control 2009, EURONOISE 2009 - Proceedings of the Institute of Acoustics*, 31(PART 3). Saatavissa: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84864675992&partnerID=tZOtx3y1>.

Asif, M., Muneer, T. ja Kelley, R. (2007) ”Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland”, *Building and Environment*, 42(3), ss. 1391–1394. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.11.023.

Bare, J. C. ym. (2000) ”Midpoints versus Endpoints : The Sacrifices and Benefits”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5, ss. 319–326. doi: 10.1007/BF02978665.

Bilec, M. ym. (2006) ”Example of a Hybrid Life-Cycle Assessment of Construction Processes”, *Journal of Infrastructure Systems*, 12(4), ss. 207–215. doi: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2006)12:4(207).

Bionova Oy (2014) *Ympäristö- ja elinkaarimittareiden hyödyntäminen ARA-kohteissa*.

Bionova Oy (2017) *Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa*.

Bueno, C. ym. (2016) ”Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: A case study on building materials”, *Journal of Cleaner Production*, 112, ss. 2208–2220. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.006.

Bueno, C. ja Fabricio, M. M. (2016) ”Application of building information modelling (BIM) to perform life cycle assessment of buildings”, *Revista Pós. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo*, 23(40). doi: 10.11606/issn.2317-2762.v23i40p96-121.

Bueno, C. ja Fabricio, M. M. (2018) ”Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in”, *Automation in Construction*. Elsevier, 90(February), ss. 188–200. doi: 10.1016/j.autcon.2018.02.028.

Cabeza, L. F. ym. (2014) "Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 29, ss. 394–416. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.037.

Chau, C. K. ym. (2007) "Environmental impacts of building materials and building services components for commercial buildings in Hong Kong", *Journal of Cleaner Production*, 15(18), ss. 1840–1851. doi: 10.1016/j.jclepro.2006.10.004.

Citherlet, S. ja Defaux, T. (2007) "Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span", *Building and Environment*, 42(2), ss. 591–598. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.09.025.

Crawford, R. H. ym. (2018) "Hybrid life cycle inventory methods – A review", *Journal of Cleaner Production*, 172, ss. 1273–1288. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.176.

Dodd, N. ym. (2017) *Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings - parts 1&2*. doi: 10.2760/827838.

Garcia-Ceballos, L., de Andres-Díaz, J. R. ja Contreras-Lopez, M. A. (2018) "Life cycle study of different constructive solutions for building enclosures", *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 626, ss. 1167–1174. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.109.

Green Building Council Finland (2013) *Rakennusten elinkaarimittarit*.

Green Building Council Finland (2018) *Rakennushankkeiden ympäristöluokitukset Suomessa*. Saatavissa: <https://figbc.fi/wp-content/uploads/2018/11/Rakennushankkeiden-ympäristöluokitukset-Suomessa.pdf>.

Haahtela, Y. ja Kiiras, J. (2014) *Talonrakennuksen kustannustieto*. Tampere, Finland: Haahtela-kehitys Oy.

Häfliger, I. F. ym. (2017) "Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials", *Journal of Cleaner Production*, 156, ss. 805–816. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.052.

Häkkinen, T. ja Vares, S. (2018) *Rakennusten khk-päästöjen ohjauksen vaikutusten arviointi*.

Heinonen, J. ym. (2016) "Pre-use phase LCA of a multi-story residential building: Can greenhouse gas emissions be used as a more general environmental performance indicator?", *Building and Environment*, 95, ss. 116–125. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.09.006.

Van Hoof, G. ym. (2013) "Indicator selection in life cycle assessment to enable decision making: Issues and solutions", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(8), ss. 1568–1580. doi: 10.1007/s11367-013-0595-z.

Hossain, M. U. ja Poon, C. S. (2018) "Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities", *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 177, ss. 387–397. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.233.

Huttunen, E. (2018) *Vähähiilisessä rakentamisessa on potentiaalia merkittäviin*

päästövähennyksiin, Ympäristöministeriö. Saatavissa: [https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Rakentamisen_ohjaus/Vahahiilinen_rakentaminen/Vahahiilisessa_rakentamisessa_on_potenti\(48543\)](https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Rakentamisen_ohjaus/Vahahiilinen_rakentaminen/Vahahiilisessa_rakentamisessa_on_potenti(48543)) (Viitattu: 15. toukokuuta 2019).

Jiang, Q. ym. (2014) "Life cycle assessment of a diesel engine based on an integrated hybrid inventory analysis model", *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 15(December), ss. 496–501. doi: 10.1016/j.procir.2014.06.091.

Kellenberger, D. ja Althaus, H.-J. (2009) "Relevance of simplifications in LCA of building components", *Building and Environment*, 44, ss. 818–825. doi: 10.1016/j.buildenv.2008.06.002.

Kuittinen, M. (2018) *Rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmä lausuntokierrokselle*. Saatavissa: [https://www.ym.fi/fi-FI/Rakennusten_hiilijalanjaljen_arviointime\(48507\)](https://www.ym.fi/fi-FI/Rakennusten_hiilijalanjaljen_arviointime(48507)) (Viitattu: 18. heinäkuuta 2019).

Kuittinen, M. (2019) *Vähähiilisen rakentamisen vuosiseminaari*. Saatavissa: <https://youtu.be/JeDur2phKYw> (Viitattu: 18. heinäkuuta 2019).

Lenzen, M. ja Crawford, R. (2009) "The path exchange method for hybrid LCA", *Environmental Science and Technology*, 43(21), ss. 8251–8256. doi: 10.1021/es902090z.

Mäenpää, H. (2014) *Hankesuunnitteluvaiheen tietomallipohjainen kustannusarviointi*. Tampere University of Technology.

McGee, C. (2013) *Australian government: Your home, Australia's guide to environmentally sustainable homes: glazing*. Saatavissa: <http://www.yourhome.gov.au/passive-design>.

Muga, H., Mukherjee, A. ja Mihelcic, J. (2008) "An Integrated Assessment of the Sustainability of Green and Built-up Roofs", *Journal of Green Building*, 3(2), ss. 106–127. doi: 10.3992/jgb.3.2.106.

Ortiz, O., Castells, F. ja Sonnemann, G. (2009) "Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA", *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 23(1), ss. 28–39. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012.

Pitsinki, V. (2018) "Haastattelu 13.9.2018". Oulu.

Poikajärvi, M. ym. (2018) *Kohti ympäristöystävällistä rakentamista*.

Poon, C. S., Yu, A. T. W. ja Ng, L. H. (2001) "On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong", *Resources, Conservation and Recycling*, 32, ss. 157–172.

Pöyry, A. ym. (2015) "Embodied and Construction Phase Greenhouse Gas Emissions of a Low-energy Residential building", *Procedia Economics and Finance*. Elsevier B.V., 21(15), ss. 355–365. doi: 10.1016/S2212-5671(15)00187-2.

Radhi, H. ja Sharples, S. (2013) "Global warming implications of facade parameters: A life cycle assessment of residential buildings in Bahrain", *Environmental Impact Assessment Review*. Elsevier Inc., 38, ss. 99–108. doi: 10.1016/j.eiar.2012.06.009.

Rakennustietosäätiö (2018) *Rakennustieto, Ympäristöseloste EPD*. Saatavissa: <http://epd.rts.fi/fi> (Viitattu: 26. kesäkuuta 2018).

Röck, M. *ym.* (2018) "LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages", *Building and Environment*. Elsevier, 140(May), ss. 153–161. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.05.006.

Sahlberg, S. (2016) *Elinkaarikustannuslaskenta julkisessa rakennushankkeessa*. Tampereen teknillinen yliopisto.

Säynäjoki, A. *ym.* (2017) "Can life-cycle assessment produce reliable policy guidelines in the building sector?", *Environmental Research Letters*. IOP Publishing, 12(1). doi: 10.1088/1748-9326/aa54ee.

Säynäjoki, A., Heinonen, J. ja Junnila, S. (2011) *Asuinalueen rakentamisessa syntyvien hiilipäästöjen hybridi-LCA-mallinnus*. Helsinki.

Schmidt, M. ja Crawford, R. H. (2018) "A framework for the integrated optimisation of the life cycle greenhouse gas emissions and cost of buildings", *Energy and Buildings*. Elsevier B.V., 171, ss. 155–167. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.04.018.

Soust-Verdaguer, B., Llatas, C. ja García-Martínez, A. (2017) "Critical review of bim-based LCA method to buildings", *Energy and Buildings*. Elsevier B.V., 136, ss. 110–120. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.009.

Souza, D. M., Teixeira, R. F. M. ja Ostermann, O. P. (2015) "Assessing biodiversity loss due to land use with Life Cycle Assessment : are we there yet ?", *Global Change Biology*, 21, ss. 32–47. doi: 10.1111/gcb.12709.

Stephan, A., Crawford, R. H. ja Myttenaere, K. De (2012) "Towards a comprehensive life cycle energy analysis framework for residential buildings", *Energy & Buildings*. Elsevier B.V., 55, ss. 592–600. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.09.008.

Suh, S. *ym.* (2004) "System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches", *Environmental Science and Technology*, 38(3), ss. 657–664. doi: 10.1021/es0263745.

Suomen standardoimisliitto SFS (2006) *SFS EN ISO 14040*.

Suomen standardoimisliitto SFS (2011) *SFS EN 15978*.

Suomen standardoimisliitto SFS (2012) *SFS-EN 15643-4*.

Suomen standardoimisliitto SFS (2014) *SFS EN 15804 + A1*.

Suomen standardoimisliitto SFS (2015) *SFS EN 16627*.

Suomen standardoimisliitto SFS (2017) *SFS EN 15643-5*.

Teshnizi, Z. *ym.* (2018) "Lessons Learned from Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of Two Residential Towers at the University of British Columbia", *Procedia CIRP*. University of British Columbia, 69(May), ss. 172–177. doi:

10.1016/j.procir.2017.11.121.

Torcellini, P., Pless, S. ja Leach, M. (2015) ”A pathway for net-zero energy buildings : creating a case for zero cost increase”, 43(1), ss. 25–33.

Virkamäki, P. ym. (2017) *Viranomaisnäkökulma rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkihjaukseen.*

Ympäristöministeriö (2018a) *Level(s) - Rakennusten resurssitehokkuuden yhteiset EU-mittarit.* Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Kansainvalinen_yhteistyo/Levels__Rakennusten_resurssitehokkuuden_yhteiset_EUmittarit (Viitattu: 30. elokuuta 2018).

Ympäristöministeriö (2018b) *Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta.*

























Ympäristöministeriö (2018c) *Rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmä.*

Ympäristöministeriö (2019) *Rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmä - uutinen.* Saatavissa: [https://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Rakennusten_hiilijalanjaljen_arviointime\(50457\)](https://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Rakennusten_hiilijalanjaljen_arviointime(50457)) (Viitattu: 18. heinäkuuta 2019).

Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A. ja Aranda Usón, A. (2011) ”Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential”, *Building and Environment*. Elsevier Ltd, 46(5), ss. 1133–1140. doi: 10.1016/j.buildenv.2010.12.002.

DIPLOMITYÖN LIITTEET

Liite 1. PSOAS sr UNO – rakennuksen energiatodistus.

ENERGIATODISTUS 2018																	
Rakennuksen nimi ja osoite:	PSOAS UNO Väikkylä Oulu																
Pysyvä rakennustunnus:																	
Rakennuksen valmistumisvuosi:	2020																
Rakennuksen käyttötarkoitusluokka:	Asuinkerrostalot, vähintään 3 asuinkerrosta																
Todistustunnus:	PSOAS UNO Energiatodistus																
Energiatodistus on laadittu																	
<input checked="" type="checkbox"/> Uudelle rakennukselle rakennuslupaa haettaessa <input type="checkbox"/> Uudelle rakennukselle käyttöönottovaiheessa <input type="checkbox"/> Olemassa olevalle rakennukselle, havainnointikäynnin päivämäärä:																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Energiatehokkuusluokka</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td> </td> </tr> <tr> <td>B</td> <td></td> </tr> <tr> <td>C</td> <td></td> </tr> <tr> <td>D</td> <td></td> </tr> <tr> <td>E</td> <td></td> </tr> <tr> <td>F</td> <td></td> </tr> <tr> <td>G</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Energiatehokkuusluokka	A	 	B		C		D		E		F		G	
	Energiatehokkuusluokka																
A	 																
B																	
C																	
D																	
E																	
F																	
G																	
Rakennuksen laskennallinen energiatehokkuuden vertailuluku eli E-luku Uuden rakennuksen E-luvun vaatimus																	
<div> <div>73</div> <div>kWh_e/(m²vuosi)</div> <div><=</div> <div>90</div> </div>																	
Todistuksen laatija:	Yritys:																
Kristian Peltomäki (Ei laatijapätevyyttä)	Väikkylä, Oulu																
Allekirjoitus:	90230																
Todistuksen laatimispäivä:	Viimeinen voimassaolopäivä:																
9.11.2018																	

YHTEENVETO RAKENNUKSEN ENERGIAATEHOKKUUDESTA

Laskennallinen ostoenergiankulutus ja energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku)

Lämmitetty nettoala	8272 m ²
Lämmitysjärjestelmän kuvaus	Vesikiertoinen lattialämmitys
Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus	Koneellinen tulo- / poistoilmanvaihto, LTO.

Käytettävä energiamuoto	Vakioidulla käytöllä laskettu ostoenergia		Energiamuodon kerroin	Energiamuodon kertoimella painotettu energiankulutus
	kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)	-	kWh _E /(m ² vuosi)
Sähkö	314733	38	1.2	45.7
Kaukolämpö	440880	53.3	0.5	26.6
Sähkön kulutukseen sisältyvä valaistus- ja kuluttajalaitesähkö	239127	28.9		
Energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku)				73

Rakennuksen energiatehokkuusluokka

Käytetty E-luvun luokittelustaieikko

Luokkien rajat asteikolla

A (<=75)	B (<=100)	C (<=130)
D (<=160)	E (<=190)	F (<=240)
G (>240)		

Tämän rakennuksen energiatehokkuusluokka

A

E-luku perustuu rakennuksen laskennallisiin kulutuksiin ja energiamuotojen kertoimiin. Kulutus on laskettu vakioitulla käytöllä lämmitettyä nettoalaa kohti, jotta eri rakennusten E-luvut ovat keskenään vertailukelpoisia. Vakioitusta käytöstä johtuen E-luku ei sovellu yksittäisen rakennuksen toteutuneen ja laskennallisen kulutuksen vertailuun. E-lukuun sisältyy rakennuksen lämmitys-, ilmanvaihto-, jäähdytysjärjestelmien sekä kuluttajalaitteiden ja valaistuksen energiankulutus. Rakennuksen ulkopuoliset kulutukset kuten autolämmityspistokkeet, sulanapilolämmitykset ja ulkovalot eivät sisälly E-lukuun.

TOIMENPIDE-EHDOTUKSIA E-LUVUN PARANTAMISEKSI

Keskeiset suositukset rakennuksen E-lukua parantaviksi toimenpiteiksi (ei koske uusia rakennuksia)

Suositukset on esitetty yksityiskohtaisemmin sivuilla 6 ja 7, kohdassa "Toimenpide-ehdotukset E-luvun parantamiseksi".

E-LUVUN LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT

Rakennuskohde

Rakennuksen käyttötarkoitusluokka	Asuinkerrostalot, vähintään 3 asuinkerrosta		
Rakennuksen valmistumisvuosi	2020	Lämmitetty nettoala	8272 m ²

Rakennusvaippa

Ilmanvuotoluku q50	4	m ³ /(hm ²)		
	A	U	UxA	Osuus lämpöhäviöistä
	m ²	W/(m ² K)	W/K	%
Ulkoseinät	4995	0.12	611	36
Yläpohja	400	0.09	36	2
Alapohja	386	0.16	62	4
Ikkunat	1179	0.72	849	51
Uiko-ovet	100	0.7	70	4
Kylmäsiilat	-	-	46	3

Ikkunat ilmansuunnittain

	A	U	gkohtisuora	
	m ²	W/(m ² K)	-	
Pohjoinen	272	0.72	0.6	
Koillinen	0	0	0	
Itä	290	0.72	0.6	
Kaakko	0	0	0	
Etelä	278	0.72	0.6	
Lounas	0	0	0	
Länsi	339	0.72	0.6	
Luode	0	0	0	

Ilmanvaihtojärjestelmä

Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus:	Koneellinen tulo- / poistoilmanvaihto, LTO.			
	Ilmavirta tulo/poisto (m ³ /s)/(m ³ /s)	Järjestelmän SFP-luku kW/(m ³ /s)	LTO:n lämpötilasuhde	Jäätymisenesto °C
Pääilmanvaihtokoneet	4.136/4.136	1.5	60 %	-
Erillispoistot	0	0	-	-
Ilmanvaihtojärjestelmä	4.136/4.136	1.5		

Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän LTO:n vuosihyötysuhde: 75 %

Lämmitysjärjestelmä

Lämmitysjärjestelmän kuvaus:	Vesikiertoinen lattialämmitys			
	Tuoton hyötysuhde	Jaon ja luovutuksen hyötysuhde	Lämpökerroin (1)	Apulaitteiden sähkönkäyttö (2) kWh/(m ² vuosi)
Tilojen ja iv:n lämmitys	97 %	85 %	-	2.5
Lämpimän käyttöveden valmistus	97 %	94 %	-	0

1) Vuoden keskimääräinen lämpökerroin lämpöpumpulle

2) Lämpöpumpputilajärjestelmissä voi sisältyä lämpöpumpun vuoden keskimääräiseen lämpökertoimeen

	Määrä kpl	Tuotto kWh	
Varaava tulisija	0	0	
Ilmalämpöpumppu	0	0	

Jäähdytysjärjestelmä

	Jäähdytyskauden painotettu kylmäkerroin
Jäähdytysjärjestelmä	-

Lämmin käyttövesi

	Ominaiskulutus dm ³ /(m ² vuosi)	Lämmitysenergian nettotarve kWh/(m ² vuosi)
Lämmin käyttövesi	600	35

Sisäiset lämpökuormat eri käyttöasteilla

	Käyttöaste	W/m ²
Henkilöt	60 %	3
Kuluttajalaitteet	60 %	4
Valaistus	10 %	9

E-LUVUN LASKENNAN TULOKSET

Rakennuskohde

Rakennuksen käyttötarkoitusluokka	Asuinkerrostalot, vähintään 3 asuinkerrosta
Rakennuksen valmistusvuosi	2020
Lämmitetty nettoala, m ²	8272
E-luku, kWh _E /(m ² vuosi)	73

E-luvun erittely

Käytettävät energiamuodot	Vakioidulla käytöllä laskettu ostoenergia kWh/vuosi	Energiamuodon kerroin -	Energiamuodon kertoimella painotettu energiankulutus	
			kWh _E /vuosi	kWh _E /(m ² vuosi)
Sähkö	314733	1.2	377680	45.7
Kaukolämpö	440880	0.5	220440	26.6
YHTEENSÄ	755613		598120	73

Rakennuksen ympäristössä olevasta energiasta otettu energia, hyödynnetty osuus (kuukausilason erittely lisätiedoissa)

	kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)

Rakennuksen teknisten järjestelmien energiankulutus

	Sähkö kWh/(m ² vuosi)	Lämpö kWh/(m ² vuosi)	Kaukojäähdytys kWh/(m ² vuosi)
Lämmitysjärjestelmä			
Tilojen lämmitys (1)	2.5	8.68	-
Tuloilman lämmitys	0	5.54	-
Lämpimän käyttöveden valmistus	0	37.48	-
Ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergiankulutus	6.57	-	-
Jäähdytysjärjestelmä	0	-	0.0
Kuluttajalaitteet ja valaistus	28.91	-	-
YHTEENSÄ	37.98	51.7	0.0

1) ilmanvaihdon tuloilman lämpeneminen tilassa ja korvausilman lämmitys kuuluu tilojen lämmitykseen

Energian nettotarve

	kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)
Tilojen lämmitys (2)	55404	6.7
Ilmanvaihdon lämmitys (3)	45822	5.54
Lämpimän käyttöveden valmistus	289520	35
Jäähdytys	0	0

2) sisältää vuotoilman, korvausilman ja tuloilman lämpenemisen tilassa
3) laskettu lämmöntalteenoton kanssa

Lämpökuormat

	kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)
Aurinko	261609	31.6
Henkilöt	130433	15.8
Kuluttajalaitteet	173911	21
Valaistus	65216	7.9
Lämpimän käyttöveden kierrosta ja varastoinnin häviöistä	1000	0.1

Laskentatyökalun nimi ja versionumero

Laskentatyökalun nimi ja versionumero	CADS 18.0
---------------------------------------	-----------

Liite 2. Tavoitehintamenettely – laskelman tulokset.

TAKU™

TAVOITEHINTA

25.10.2018

Sivu 1/2

Kristian Peltomäki
Oulun YliopistoHanke:
1 v0.2 Psoas UNO

Välkkylä

Vaihe:
 Paikkakunta: Oulu
 Haahela-ind.: 89,0 / 1.2018
 Hintataso: 92,0 / 9.2018
 Laajuus: 8 967 m2, 10 481 brm2, 35 062 rm3
 Hankekoko: 10 481 brm2
 Jakaja: 8 953 brm2

PERUSTAMISKUSTANNUKSET, UUDIS - PÄÄRYHMITÄIN

Talo 80 -nimikkeistö	€	€/brm2	%
B1 Rakennuttajan kustannukset			
Suunnittelu ja tutkimukset	1 293 000	144	5,6
Rakennuttaminen ja valvonta	1 190 000	133	5,1
Liittymismaksut	205 000	23	0,9
Muut rakennuttajan kustannukset			
Yhteensä	2 688 000	300	11,6
B2 Rakennustekniset työt			
1 Aluetyöt	489 000	55	2,1
1 Rakennuksen maatyöt	1 034 000	115	4,5
2 Perustukset ja kellarin erityisrakenteet	282 000	31	1,2
3 Runko- ja vesikattorakenteet	3 845 000	429	16,6
4 Täydentävät rakenteet	1 513 000	169	6,5
5 Sisäpuoliset pintarakenteet	2 783 000	311	12,0
6 Kalusteet, varusteet, laitteet	934 000	104	4,0
7 Konetekniset työt	1 651 000	184	7,1
8,9 Työmaan käyttö- ja yhteiskust.	1 369 000	153	5,9
Kate	2 360 000	264	10,2
Yhteensä	16 261 000	1 816	70,1
B3 LVI-työt			
71 Lämmityslaitteet	216 000	24	0,9
71 Vesi- ja viemäri-työt	702 000	78	3,0
71 Muut putkityöt	840 000	94	3,6
72 Ilmanvaihtotyöt	382 000	43	1,6
72 Säätilalaitteet	95 000	11	0,4
72 Muut iv-työt	89 000	10	0,4
Yhteensä	2 324 000	260	10,0

TAVOITEHINTA

Sivu 2/2

Talo 80 -nimikkeistö	€	€/brm2	%
B4 Sähkötyöt			
Valaistus	291 000	33	1,3
Sähkön jakelu	77 000	9	0,3
Sähkökeskukset	290 000	32	1,2
Muu sähkö	453 000	51	2,0
Yhteensä	1 111 000	124	4,8
B5 Erillishankinnat	166 000	19	0,7
B1...B5 Rakennuskustannukset yhteensä	22 550 000	2 519	97,2
Muut kustannukset			
Tontti			
Toimintavarustus			
Toiminnan ylläpito			
Rahoitus			
Hankevaraukset	656 000	73	2,8
Muut kustannukset	656 000	73	2,8
PERUSTAMISKUSTANNUKSET	23 206 000	2 592	100,0
Arvonlisävero 24% (ei sis. tontin hankintaa ja hankerahoitusta)	5 569 000	622	
PERUSTAMISKUSTANNUKSET YHTEENSÄ	28 775 000	3 214	

TAKU™

TAVOITEHINTA

25.10.2018

Sivu 1/2

Kristian Peltomäki

Oulun Yliopisto

Hanke:

1 v0.2 Psoas UNO

Välkkylä

Vaihe:

Paikkakunta: Oulu

Haahela-ind.: 89,0 / 1.2018

Hintataso: 92,0 / 9.2018

Laajuus: 8 967 m2, 10 481 brm2, 35 062 rm3

Hankekoko: 10 481 brm2

TILALUETTELO, UUDISHINTA

Osa	Käyttäjä Huonro	Tila/Toiminta	m²/tila	kpl	m²	€/m²	€
AS		ASUNNOT					
AS		1 h + k, A1	21,5	90,0	1 935	2 798	5 414 900
AS		1 h + k, B1	34,0	36,0	1 224	2 789	3 413 400
AS		1 h + k, C1	31,0	18,0	558	2 657	1 482 800
AS		2 h + k, E1	38,0	18,0	684	2 501	1 710 700
AS		YHTEISTILAT					
Yhteensä				162	4 401	2 732	12 021 800
YT		Huoneistovarasto1/VSS1	78,5	1,0	79	2 929	229 900
YT		Ulkovälinevarasto	51,5	1,0	52	1 635	84 500
YT		Ulkovälinevarasto2/VSS2	69,0	1,0	69	2 848	196 500
YT		Pyörävarasto	80,5	1,0	81	2 564	206 400
YT		Pyörähuolto	13,5	1,0	14	2 488	33 600
YT		Pukuhuone	8,0	2,0	16	2 613	41 800
YT		Sauna	13,0	2,0	26	2 742	71 300
YT		Pesuhuone	5,0	2,0	10	4 084	40 800
Yhteensä				11	345	2 621	904 900
MT		MONIKÄYTTÖTILAT					
MT		Aula	62,5	1,0	63	2 959	185 000
MT		Kirjastotila ja kierrätys	34,5	1,0	35	2 816	97 100
MT		Pesutupa	32,0	1,0	32	3 369	107 800
MT		Pelisali	38,0	1,0	38	2 398	90 600
MT		Yhteistila	46,5	18,0	837	2 254	1 886 800
MT		Yhteiskeittiö	6,5	18,0	117	4 917	575 300
MT		Kuntoilu ja harrastus	63,5	1,0	64	2 402	152 600
MT		Bilettila	64,0	1,0	64	2 563	164 000
MT		Wc-huone, inva	5,5	1,0	6	3 868	21 300
MT		Wc-huone	2,0	1,0	2	5 169	10 300
MT		Wc-huone, inva	4,5	1,0	5	4 137	18 600
MT		Wc-huone, inva	7,5	1,0	8	3 531	26 500
MT		LIIKENNE					

TAVOITEHINTA

Sivu 2/2

Osa	Käyttäjä	Huonro	Tila/Toiminta	m²/tila	kpl	m²	€/m²	€
MT			Osastoiva liikenne (porrashuone)	31,5	1,0	32	2 394	75 400
MT			Osastoiva liikenne (porrashuone)	19,0	20,0	380	2 625	997 400
MT			Jakava liikenne (käytävät)	16,5	1,0	17	2 840	46 900
MT			Jakava liikenne (käytävät)	17,0	1,0	17	2 832	48 100
MT			Tuulikaappi	2,5	1,0	3	5 005	12 500
MT			Poistumistie	14,0	1,0	14	2 796	39 100
MT			Jakava liikenne (käytävät)	17,0	1,0	17	2 914	49 500
MT			Savusulku/kerrosaula	5,0	19,0	95	3 314	314 800
MT			Jakava liikenne (käytävät)	31,5	18,0	567	2 825	1 601 500
MT			Jakava liikenne (käytävät)	8,5	1,0	9	3 136	26 700
MT			TEKNIikka					
MT			VSS1/iv	8,0	1,0	8	3 176	25 400
MT			LJH	20,0	1,0	20	1 846	36 900
MT			VSS2/iv	4,5	1,0	5	3 282	14 800
MT			SPK/VSS	25,0	1,0	25	1 814	45 400
MT			Teletila/VSS2	5,5	1,0	6	3 228	17 800
MT			IV-KH/VSS2	90,5	1,0	91	3 442	311 500
MT			Siivouskeskus	5,5	1,0	6	2 597	14 500
MT			Kiinteistövarasto	6,0	1,0	6	2 283	13 500
MT			MUUT TILAT					
MT			Kylmä porrashuone	13,5	1,0	14	2 713	36 600
MT			Kylmä porrashuone	11,7	21,0	246	3 090	759 200
MT			Parveke	50,0	20,0	1 000	1 846	1 845 700
MT			Ullakkovarasto	280,0	1,0	280	1 566	438 500
MT			Terassi	50,0	2,0	100	1 714	171 400
Yhteensä					163	4 221	2 435	10 279 300
Yhteensä					336	8 967	2 588	23 206 000

Tiloille kohdistamattomat hanketekijät

- 41 Maa-alue tehtävät
- 42 Rahoitus ja markkinointi
- 51 Tilavarustus
- 52 Toiminnan ylläpito
- 6 Hankevaraukset

Tiloille kohdistamattomat hanketekijät yhteensä

HANKINTAHINTA	2 588	23 206 000
Arvonlisävero 24% (ei sis. tontin hankintaa ja hankerahoitusta)	621	5 569 000
HANKINTAHINTA YHTEENSÄ	3 209	28 775 000

Liite 3. BIM-LCA integrointiin soveltuvia työkaluja
(Bueno ja Fabricio, 2018).

BIM - LCA - työkalu	Ominaisuudet	Rajoitukset
Elodie	Simplified LCA compliant with European standards. Design alternatives can be compared. Energy performance in the design and construction solutions. Environmental impacts assessment at the construction site. Computation of transport of users and of major environmental contributors.	Separate software, needs to import data from BIM File. Software - most of the information is only available in French.
eTool LCA	Detailed reports with comparable information on environmental data. Multiple Impact Reporting, including CO ₂ , Cost, Energy, Water, Land Use, Ozone Depletion, Human Toxicity Web-based software, with a pay-as-you-go certification, reviewed by third parties. Compliant with ISO 14044 and European Standards.	Separate software, needs to import data from BIM File. Free version does not allow the user to print the assessment reports.
Green building assessment tool (GBAT)	The framework builds a relationship between the BIM and the green building rating processes. IMPACT compliant assessments, including BREEAM credits.	Separate software, needs to import data from BIM File. Presents the available credits limited to only a subset of the available BREEAM materials. The material database cannot be automatically updated from the BREEAM database and there is manual effort to convert it to the materials library.
Green Building Studio®	Carbon emissions report. Energy analysis of complete buildings. Daylighting, Water use and related costs and natural ventilation analysis. Cloud-based software. It can be used as a supporting tool for impact assessment of the building operation phase. Support for LEED and Energy Star certifications.	Very broad thermal and energy balance software, not only dedicated to LCA studies. Does not perform full LCA studies. Separate software, needs to import data from BIM File.
Impact Compliant Suite	LCA compliant with British standards. BRE ecopoint output. Integrated LCA, Life-Cycle Costing (LCC) and Capital Costing (CC). IMPACT compliant assessments, including BREEAM credits.	Separate software, needs to import data from BIM File.

BIM - LCA - työkalu	Ominaisuudet	Rajoitukset
LCA Design™ (Ecospecifier)	<p>A single ecopoint output. Choice of environmental inventory, impacts and point-score measures. Comparative ecoprofiling at all levels of design. Detailed graphical and tabular outputs. Cost variations. Compliant with ISO Standards.</p>	<p>Difficulty in finding detailed information about the software and the data and methods applied on it. No trial version available for testing so far.</p>
Lesosai	<p>Basic version of building LCA, directed mainly to Switzerland, France, Luxembourg, Italy, Germany and Romania. Calculation of environmental impacts from energy consumption from building operation LCIA methodology according to Swiss standards. Database updated by the materials producers. Unlimited time use for free Demo version.</p>	<p>Separate software, needs to import data from BIM File. Very broad thermal and energy balance software, not only dedicated to LCA studies. LCA studies are regionally specified. Demo version does not allow to print the assessment reports.</p>
One Click LCA	<p>Simplified LCA Compliant with BREEAM, LEED, HQE, DGNB and other certification schemes. Integrated building site impacts and life-cycle cost (LCC). Environmental Product Declarations (EPD) database. Verified by third parties.</p>	<p>Difficult to find information.</p>
Tally™	<p>LCA for the whole building or a comparative analysis of building design options Identification of the largest environmental impacts and their comparison between the different materials and design options. As a Revit plug-in, it allows the user to perform LCA within BIM environment, with no special modelling practices. Available information on applied data and methods and complete tutorials. Flexible non-commercial licenses. Intuitive and user friendly interface.</p>	<p>It is specific for Autodesk Revit Software. The inventory data as the LCIA methods cannot be changed or updated by the user.</p>

Liite 4. LCI – menetelmien laskentakaavat.

Laskentakaavat on esitelty Crawford ym. (2018) tutkimuksessaan esittämällä tyylillä [(Heijungs ja Suh, 2002), (Lenzen ja Crawford, 2009), (Joshi, 1999), ja (Suh, 2004)] (Crawford ym., 2018) mukaan.

Panos-tuotosmalli (Input-Output): Arvioitaessa ympäristökuormia ja – vaatimuksia m , jotka liittyvät tiettyyn talouden sektoriin S , jota kuvataan sektoreilla n , voidaan laskentaan käyttää yhtälöä (1)

$$q_s = R(I - A)^{-1} y_s, \quad (1)$$

missä q_s on kokonaisympäristökuorman vektori sektorille S (dimensio $m \times 1$),
 R on matriisi, joka sisältää kaikki m ympäristökuormat ja -vaatimukset, jotka liittyvät kaikkiin n sektoreihin (dimensio $m \times n$),
 I on yksikkömatriisi (dimensio $m \times m$),
 A on panos-tuotomatriisi (dimensio $n \times n$),
 y_s on sektorin S kysyntävektori (dimensio $n \times 1$).

Prosessimalli (Process): Arvioitaessa ympäristökuormia ja – vaatimuksia t , jotka liittyvät tiettyyn yksikköprosessiin U , jota kuvataan tietokannalla, joka sisältää z prosessia, voidaan laskentaan käyttää yhtälöä (2)

$$q_u = \tilde{R}T^{-1}\tilde{y}_u, \quad (2)$$

missä q_u on kokonaisympäristökuorman vektori prosessille U (dimensio $t \times 1$),
 \tilde{R} on matriisi, joka sisältää kaikki m ympäristökuormat ja -vaatimukset, jotka liittyvät kaikkiin tietokannan prosesseihin z (dimensio $t \times z$),
 T on teknologiamatriisi (technology matrix) (dimensio $z \times z$),
 \tilde{y}_u on prosessin U kysyntävektori (dimensio $z \times 1$).

Kerrostettu hybridimalli (Tiered Hybrid) voidaan yksinkertaistaa panos-tuotos – ja prosessimallien komponenttien summaksi, jolloin saadaan yhtälö (3)

$$q_h = q_s + q_u, \quad (3)$$

missä q_h on kokonaisympäristökuorman vektori (dimensio $m \times 1$),
 q_s on kokonaisympäristökuorman vektori sektorille S (dimensio $m \times 1$),
 q_u on kokonaisympäristökuorman vektori prosessille U (dimensio $t \times 1$).

Sijoittamalla yhtälöt (1) ja (2) yhtälöön (3) ja yhdistämällä komponentit voidaan hybridikomponenttiin \mathbf{H} liittyvien ympäristökuormien ja – vaatimusten laskentaan käyttää yhtälöä (4)

$$q_h = (\tilde{\mathbf{R}} \mathbf{R}) \begin{bmatrix} \mathbf{T} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} - \mathbf{A} \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{y}_u \\ y_s \end{pmatrix}, \quad (4)$$

missä q_h on kokonaisympäristökuorman vektori hybridikomponentille \mathbf{H} (dimensio $m \times 1$),
 \mathbf{T} on teknologiamatriisi (technology matrix) (dimensio $z \times z$),
 \mathbf{I} on yksikkömatriisi (dimensio $n \times n$),
 \mathbf{A} on panos-tuotomatriisi (dimensio $n \times n$),
 y_s on kysyntävektori sektorille S, joka liittyy hybridikomponenttiin \mathbf{H} (dimensio $n \times 1$),
 \tilde{y}_u on kysyntävektori prosessille U, joka liittyy hybridikomponenttiin \mathbf{H} (dimensio $z \times 1$),
 \mathbf{R} ja $\tilde{\mathbf{R}}$ ovat matriisit, jotka sisältävät kaikki m ympäristökuormat ja -vaatimukset, jotka liittyvät kaikkiin n sektoreihin (dimensio $m \times n$) ja kaikki m ympäristökuormat ja -vaatimukset, jotka liittyvät kaikkiin tietokannan prosesseihin z (dimensio $m \times z$).

Polunvaihto hybridimallissa (Path Exchange) sektorin S panos-tuotomatriisi ja yksikköprosessin U teknologiamatriisi puretaan yhtälöiksi (5) ja (6), jotka puretaan edelleen sarjaksi polkuja: panos-tuotos-tiedoille yhtälöt (7) ja (8), prosessitiedoille yhtälöt (9) ja (10). Matriisien purkaminen näyttää muiden sektoreiden (i, j, k) tuotokset

tutkittavalle sektorille \mathbf{S} , sekä muiden yksikköprosessien (t, v, w) tuotokset tutkittavaan prosessiin \mathbf{U} . Jokainen A_{js} :n iteraatio sektorille \mathbf{S} ja T_{tu} :n iteraatio yksikköprosessille \mathbf{U} vastaa solmupistettä tuotantoketjussa (tai prosessipuussa). Malli toimii määräämällä vastaavuuksia tiettyjen solmupisteiden välille panos-tuotos- ja prosessitiedoissa. Muokattu toimitusketju voidaan summata yhtälöksi (11). Yhtälöiden (5) – (11) merkit on selitetty yhtälön (11) jälkeen. Purkamalla matriisit \mathbf{S} ja \mathbf{U} saadaan

$$q_s = \mathbf{R}y_s + \mathbf{R}\mathbf{A}y_s + \mathbf{R}\mathbf{A}^2y_s + \dots + \mathbf{R}\mathbf{A}^\infty y_s \quad \text{ja} \quad (5)$$

$$q_u = \tilde{\mathbf{R}}\tilde{y}_u + \tilde{\mathbf{R}}\mathbf{T}\tilde{y}_u + \tilde{\mathbf{R}}\mathbf{T}^2\tilde{y}_u + \dots + \tilde{\mathbf{R}}\mathbf{T}^\infty\tilde{y}_u, \quad (6)$$

jotka voidaan purkaa edelleen, jolloin saadaan panos-tuotos-tiedoille

$$q_s = \sum_{j=1}^n y_j r_j (\delta_{js} + \mathbf{A}_{js} + (\mathbf{A}^2)_{js} + \dots + (\mathbf{A}^\infty)_{js}) \quad \text{ja} \quad (7)$$

$$q_s = \sum_{j=1}^n y_j r_j (\delta_{js} + \mathbf{A}_{js} + \sum_{k=1}^n \mathbf{A}_{jk}\mathbf{A}_{ks} + \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \mathbf{A}_{jl}\mathbf{A}_{lk}\mathbf{A}_{ks} + \dots), \quad (8)$$

sekä prosessitiedoille

$$q_u = \sum_{t=1}^z \tilde{y}_t \tilde{r}_t (\delta_{tu} + \mathbf{T}_{tu} + (\mathbf{T}^2)_{tu} + \dots + (\mathbf{T}^\infty)_{tu}) \quad \text{ja} \quad (9)$$

$$q_u = \sum_{t=1}^z \tilde{y}_t \tilde{r}_t \left(\delta_{tu} + \mathbf{T}_{tu} + \sum_{v=1}^n \mathbf{T}_{tv}\mathbf{T}_{vu} + \sum_{w=1}^n \sum_{v=1}^n \mathbf{T}_{tw}\mathbf{T}_{wv}\mathbf{T}_{vu} + \dots \right). \quad (10)$$

Arvioitaessa hybridikomponenttia \mathbf{H} , joka vastaa panos-tuotos – sektoria \mathbf{S} ja prosessia \mathbf{U} , voidaan hybridikomponenttiin \mathbf{H} liittyvien ympäristökuormien ja – vaatimusten laskentaan käyttää yhtälöä (11)

$$q_h = \tilde{y}_t \tilde{r}_t \left(\delta_{tu} + \mathbf{T}_{tu} + \sum_{k=1}^n \mathbf{T}_{tv} \mathbf{A}_{ks} \right) + \sum_{j=1}^n y_j r_j \left(\sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \mathbf{A}_{jl} \mathbf{A}_{lk} \mathbf{A}_{ks} + \dots \right) \quad (11)$$

missä q on kokonaisympäristökuorman vektori hybridikomponentille \mathbf{H} (dimensio $m \times 1$),
 \mathbf{T} on teknologiamatriisi (technology matrix) (dimensio $z \times z$),
 \mathbf{A} on panos-tuotomatriisi (dimensio $n \times n$),
 y on kysyntävektori sektorille \mathbf{S} , joka liittyy hybridikomponenttiin \mathbf{H} (dimensio $n \times 1$),
 \tilde{y} on kysyntävektori prosessille \mathbf{U} , joka liittyy hybridikomponenttiin \mathbf{H} (dimensio $z \times 1$),
 \mathbf{R} on matriisi, joka sisältää kaikki m ympäristökuormat ja -vaatimukset, jotka liittyvät kaikkiin n sektoreihin (dimensio $m \times n$),
 $\tilde{\mathbf{R}}$ on matriisi, joka sisältää kaikki m ympäristökuormat ja -vaatimukset, jotka liittyvät kaikkiin tietokannan prosesseihin z (dimensio $m \times z$),
 r ja \tilde{r} ovat vektoreita, jotka sisältävät ympäristökuormia ja -vaatimuksia sektoreille ja yksittäisille prosesseille (dimensio $m \times 1$),
 δ on sektorin \mathbf{S} tai prosessin \mathbf{U} panos-tuotoskerroin.

Matriisin laajennus hybridimallissa (Matrix Augmentation) käytetään panos-tuotos – mallin yhtälöä (1), mutta komponenttien dimensiota muutetaan, jolloin saadaan yhtälö (14). \mathbf{A} ja \mathbf{R} matriiseihin lisätään x sektoria joko purkamalla olemassa oleva sektori tai lisäämällä hypoteettinen sektori. Matriisit muokataan muotoon

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,n} & a_{1,n+x} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & \dots & a_{n,n} & a_{n,n+x} \\ a_{n+x,1} & \dots & a_{n+x,n} & a_{n+x,n+x} \end{bmatrix} \text{ ja} \quad (12)$$

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} r_{1,1} & \dots & r_{1,n} & r_{1,n+x} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ r_{m,1} & \dots & r_{m,n} & r_{m,n+x} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

jotka sijoittamalla panos-tuotos – mallin yhtälöön (1) saadaan yhtälö (14). Hybridikomponenttiin \mathbf{H} liittyvien ympäristökuormien ja – vaatimusten laskentaan voidaan käyttää yhtälöä (14)

$$q_h = \mathbf{R}'(\mathbf{I} - \mathbf{A}')^{-1} y'_h, \quad (14)$$

missä q_h on kokonaisympäristökuorman vektori sektorille \mathbf{S} , joka liittyy hybridikomponenttiin \mathbf{H} (dimensio $m \times 1$),
 \mathbf{A}' on laajennettu panos-tuotomatriisi, joka sisältää x lisättyä sektoria (dimensio $(n+x) \times (n+x)$),
 \mathbf{R}' on laajennettu matriisi, joka sisältää kaikki m ympäristökuormat ja -vaatimukset, jotka liittyvät kaikkiin $n+x$ sektoreihin (dimensio $m \times (n+x)$),
 \mathbf{I} on yksikkömatriisi (dimensio $(n+x) \times (n+x)$),
 y'_h on kysyntävektori sektorille \mathbf{S} , joka liittyy hybridikomponenttiin \mathbf{H} (dimensio $(n+x) \times 1$).

Integroidussa hybridimallissa (Integrated hybrid) panos-tuotokomponenttien ja prosessikomponenttien väliset yhteydet ratkaistaan sisäisesti integroidussa matriisissa $\bar{\mathbf{A}}$, käyttämällä edeltävän prosessin(upstream) ja seuraavan prosessin(downstream) rajoitusmatriiseja \mathbf{C}^u ja \mathbf{C}^d . Edeltävän prosessin rajoitusmatriisi edustaa tuotoksia prosesseista, jotka olisivat teknologiamatriisissa, mutta joille prosessidataa ei ole saatavilla. Tällä tavalla tietoja voidaan ottaa panos-tuotos – matriisista aukkojen täyttämiseksi. Seuraavan prosessin rajoitusmatriisi esittää tapaa, jolla tuotteet ja palvelut, joita mallinnetaan teknologiamatriisilla, jaetaan talouden muille alueille. Arvioitaessa hybridikomponenttiin \mathbf{H} liittyviä ympäristökuormia ja – vaatimuksia, voidaan laskentaan käyttää yhtälöä (15)

$$q_h = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{R}} & 0 \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{T} & -\mathbf{C}^d \\ -\mathbf{C}^u & \mathbf{I} - \mathbf{A} \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{y}_u \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

joka voidaan sieventää muotoon

$$q_h = \bar{\mathbf{R}}\bar{\mathbf{A}}^{-1}\bar{\mathbf{y}}_h, \quad (16)$$

missä q_h on kokonaisympäristökuorman vektori hybridikomponentille \mathbf{H} (dimensio $m \times 1$),
 \mathbf{T} on teknologiamatriisi (technology matrix) (dimensio $z \times z$),
 \mathbf{A} on panos-tuotomatriisi (dimensio $n \times n$),
 $\tilde{\mathbf{y}}_u$ on kysyntävektori prosessille \mathbf{U} , joka liittyy hybridikomponenttiin \mathbf{H} (dimensio $z \times 1$),
 $\bar{\mathbf{y}}_h$ on hybridikysyntävektori,
 \mathbf{I} on yksikkömatriisi (dimensio $n \times n$),
 \mathbf{C}^u on edeltävän prosessin rajoitusmatriisi (dimensio $n \times z$),
 \mathbf{C}^d on seuraavan prosessin rajoitusmatriisi (dimensio $z \times n$),
 \mathbf{R} on matriisi, joka sisältää kaikki m ympäristökuormat ja -vaatimukset, jotka liittyvät kaikkiin n sektoreihin (dimensio $m \times n$),
 $\tilde{\mathbf{R}}$ on matriisi, joka sisältää kaikki m ympäristökuormat ja -vaatimukset, jotka liittyvät kaikkiin tietokannan prosesseihin z (dimensio $m \times z$),
 $\bar{\mathbf{R}}$ on \mathbf{R} ja $\tilde{\mathbf{R}}$ summa,
 $\bar{\mathbf{A}}$ on integroitu matriisi (dimensio $(n+z) \times (n+z)$).

EN 15978 – standardissa ympäristövaikutusten laskentaan esitellään yhtälö (17)

$$\mathbf{EP}_i = \vec{a}_j \times \mathbf{M}, \quad (17)$$

missä \mathbf{EP}_i on valitun indikaattorin arvo elinkaaren vaiheessa i ,
 \vec{a}_j on vektori, joka sisältää kaikkien tuotteiden ja palveluiden bruttomäärät rakennuksen moduulissa j ,
 \mathbf{M} on matriisi, joka sisältää ympäristövaikutusindikaattoreiden arvot tuotteiden ja palveluiden yksikköä kohden elinkaaren vaiheessa i (Suomen standardoimisliitto SFS, 2011).